

**ABSTRACT TESI:** La crescente domanda di raffrescamento costituisce una delle principali sfide energetiche del settore edilizio nel contesto della crisi climatica, in particolare negli edifici terziari del bacino mediterraneo, dove l'aumento delle temperature e delle ondate di calore intensifica consumi elettrici ed emissioni di CO<sub>2</sub>. In tale scenario, la ricerca esplora il potenziale dei sistemi di raffrescamento passivo basati sulla ventilazione come strumenti di riduzione preventiva del fabbisogno energetico. La tesi si concentra sul Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), interpretato come infrastruttura termo-ambientale capace di sfruttare l'inerzia termica del sotto-suolo e della massa edilizia per il pre-trattamento dell'aria. La metodologia integra quattro fasi: definizione del quadro teorico-normativo e scientifico; analisi comparativa di casi studio internazionali; sistematizzazione tecnologica e valutazione dei componenti secondo criteri prestazionali; validazione sperimentale mediante simulazioni termo-fluidodinamiche applicate al caso pilota sperimentale del Rome Technopole. I risultati dimostrano che le prestazioni del sistema sono fortemente influenzate dall'interazione tra configurazione geometrica del labirinto, capacità di accumulo della massa termica e condizioni microclimatiche locali. Le simulazioni condotte evidenziano una significativa attenuazione dei picchi termici estivi, con una riduzione della temperatura dell'aria lungo il condotto pari a  $\Delta T \approx 12-13$  °C, e una conseguente diminuzione dei carichi di raffrescamento che si traduce in un risparmio energetico complessivo stimabile nell'ordine del 25-30% rispetto a soluzioni impiantistiche convenzionali. Il contributo della ricerca alla Progettazione Tecnologica Ambientale si concretizza nella definizione di parametri prestazionali, matrici comparative e indirizzi metodologici utili all'integrazione del sistema nei processi progettuali. Ne deriva un modello operativo replicabile, capace di supportare interventi di rigenerazione urbana sostenibile e di concorrere in modo significativo al raggiungimento degli obiettivi di riduzione dei consumi energetici e di neutralità climatica.

**ABSTRACT THESIS:** The growing demand for cooling represents one of the main energy challenges facing the construction sector in the context of the climate crisis, particularly in commercial buildings across the Mediterranean region, where rising temperatures and heatwaves are driving up electricity consumption and CO<sub>2</sub> emissions. Against this backdrop, this research explores the potential of passive cooling systems based on ventilation as a means of proactively reducing energy demand. The thesis focuses on the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), understood as a thermo-environmental infrastructure capable of exploiting the thermal inertia of the sub-soil and the building mass for air pre-treatment. The methodology comprises four phases: definition of the theoretical, regulatory and scientific framework; comparative analysis of international case studies; technological systematisation and evaluation of components according to performance criteria; experimental validation through thermo-fluid dynamic simulations applied to the experimental pilot case of the Rome Technopole. The results demonstrate that the system's performance is strongly influenced by the interaction between the geometric configuration of the labyrinth, the thermal mass's storage capacity and local microclimatic conditions. The simulations conducted highlight a significant attenuation of summer temperature peaks, with a reduction in air temperature along the duct of  $\Delta T \approx 12-13$  °C, and a consequent reduction in cooling loads, resulting in an estimated overall energy saving of around 25-30% compared with conventional systems. The contribution of this research to Environmental Technology Design takes the form of the definition of performance parameters, comparative matrices and methodological guidelines useful for integrating the system into design processes. The result is a replicable operational model capable of supporting sustainable urban regeneration initiatives and contributing significantly to the achievement of energy consumption reduction and climate neutrality targets.

SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO PASSIVI BASATI SULLA VENTILAZIONE  
PER EDIFICI DESTINATI AD USI TERZIARI NEL CLIMA MEDITERRANEO

**DOTTORANDA**  
Kristina Mitrik

**Dottorato di Ricerca**  
Planificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura

Sapienza Università di Roma | SAPIENZA UNIVERSITY OF ROME | ciclo cycle XXXVIII | nov. 2022 - mag. 2026  
Scuola di Dottorato in Ingegneria Civile e Architettura | DOCTORAL SCHOOL IN CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE  
Dipartimento di 'Planificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura' | 'PLANNING, DESIGN, TECHNOLOGY OF ARCHITECTURE' DEPARTMENT



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dottorato di Ricerca **PIANIFICAZIONE, DESIGN, TECNOLOGIA  
DELL'ARCHITETTURA**  
PHD PLANNING, DESIGN, TECHNOLOGY OF ARCHITECTURE  
Coordinatore | Prof.ssa Laura Ricci

Curriculum **PROGETTAZIONE TECNOLOGICA AMBIENTALE**  
Curriculum ENVIRONMENTAL TECHNOLOGICAL DESIGN  
Coordinatore Curriculum | Curriculum Chair  
Prof.ssa Alessandra Battisti

**SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO PASSIVI BASATI  
SULLA VENTILAZIONE PER EDIFICI DESTINATI AD USI TERZIARI  
NEL CLIMA MEDITERRANEO:**

analisi e applicazione del *Thermal Labyrinth Ventilation System* (TLVS) per la  
riduzione del fabbisogno energetico durante la stagione estiva

**Dottoranda** | PhD Candidate Kristina Mitrik  
**Supervisore** | Supervisor Prof. Fabrizio Tucci  
**Co-supervisore** | Co-Supervisor Prof. Domenico D'Olimpio  
**Co-supervisore** | Co-Supervisor RTD-A Valeria Cecafozzo  
**Co-supervisore** | Co-Supervisor RTD-A Giada Romano

Ciclo | Cycle XXXVIII  
Novembre 2022 - Maggio 2026



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Italy License.





SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

DOTTORATO DI RICERCA

Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura

COORDINATORE

Prof.ssa Laura Ricci

CURRICULUM

Progettazione Tecnologica Ambientale

COORDINATORE CURRICULUM

Prof.ssa Alessandra Battisti

SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO PASSIVI BASATI  
SULLA VENTILAZIONE PER EDIFICI DESTINATI AD USI  
TERZIARI NEL CLIMA MEDITERRANEO:

analisi e applicazione del *Thermal Labyrinth Ventilation System* (TLVS)  
per la riduzione del fabbisogno energetico durante la stagione estiva

DOTTORANDA

Kristina Mitrik

SUPERVISORE

Prof. Fabrizio Tucci

CO-supervisori:

Prof. Domenico D'Olimpio, Dipartimento PDTA

RTD-A Valeria Cecafozzo, Dipartimento PDTA

RTD-A Giada Romano, Dipartimento PDTA

CICLO XXXVIII

Novembre 2022 - Maggio 2026

## Ringraziamenti

*Questo percorso di ricerca non sarebbe stato lo stesso senza le persone che, in modi diversi, mi sono state accanto lungo questi anni, offrendomi supporto, fiducia e presenza costante.*

*Desidero esprimere un ringraziamento al Prof. Fabrizio Tucci, per la guida scientifica e l'opportunità di partecipare alle attività di ricerca sviluppate nell'ambito della Fondazione Rome Technopole, che hanno rappresentato un riferimento fondamentale per la costruzione del presente lavoro di tesi. Un ringraziamento va inoltre ai co-supervisor, Prof. Domenico D'Olimpio, Valeria Cecafozzo e Giada Romano, per i preziosi suggerimenti, il costante confronto scientifico e il supporto metodologico fornito durante le fasi della ricerca. Un sincero ringraziamento è rivolto anche al gruppo di ricerca coinvolto nelle attività del Rome Technopole e ai miei colleghi di Dottorato, con i quali ho avuto l'opportunità di condividere una collaborazione interdisciplinare continua. Questo percorso comune ha rappresentato non soltanto un'importante occasione di crescita accademica e professionale, ma anche la possibilità di costruire rapporti fondati sulla stima reciproca, sulla condivisione degli obiettivi di ricerca e sull'entusiasmo verso i temi trattati.*

*Un ringraziamento particolare va a Maria Michaela, Federica, Violetta e Caterina, figure che, nel corso di questo percorso, hanno rappresentato un punto di riferimento costante, quasi delle mentori. La loro disponibilità, il supporto continuo e la pazienza con cui hanno sempre accolto ogni dubbio o richiesta di confronto hanno costituito un aiuto prezioso sia sul piano umano che professionale. In mezzo alla fatica e alle responsabilità, non sono mai mancati il confronto, le risate e quei momenti di leggerezza capaci di trasformare il lavoro quotidiano in un'esperienza autentica e condivisa. Infine ringrazio Lavinia, compagna di percorso non solo durante il dottorato, ma fin dai tempi dell'università. Sempre presente e disponibile, anche nei momenti più complessi, con la capacità di trasformare ogni difficoltà in un'occasione di confronto e crescita.*

*Un pensiero speciale va alla mia famiglia e ai miei amici più stretti, per il sostegno costante, la tanta pazienza e l'affetto con cui mi hanno accompagnata lungo questo percorso. In particolare, desidero dedicare un ringraziamento speciale a mia nonna Lidia, presenza silenziosa ma fondamentale, per l'amore incondizionato, la forza e la fiducia con cui mi ha sempre sostenuta. La sua vicinanza, la sua sensibilità e la capacità di incoraggiarmi anche nei momenti più difficili hanno rappresentato per me un punto di riferimento costante e una profonda fonte di leggerezza e serenità durante il percorso di ricerca.*

*Infine, un ringraziamento a cuor sincero va a Elena, amica di una vita. Anche nella distanza, non ha mai smesso di essermi vicina, sostenendomi con affetto, ascolto e incoraggiamento costante. La sua presenza discreta ma autentica, la fiducia nel mio percorso e il sostegno dimostrato verso il mio lavoro hanno rappresentato, negli anni, un punto fermo di grande valore.*

*Alle persone a me più care, che hanno saputo vedere in me ciò che io stessa non riuscivo ancora a riconoscere.*

*"Lascia che la pace della natura entri in te come i raggi del sole penetrano le fronde degli alberi. Lascia che i venti ti soffino dentro la loro freschezza e che i temporali ti carichino della loro energia. Allora le tue preoccupazioni cadranno come foglie d'autunno."*

Our National Parks, 1901

John Muir

## INDICE

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CAPITOLO 0</b> | <b>INTRODUZIONE OGGETTO DELLA RICERCA, METODOLOGIA E STRUTTURA DELLA TESI</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| p. 20             | 0.0 Contesto di inquadramento ed individuazione del tema di tesi: borsa Rome Technopole con finanziamento PNRR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| p. 22             | 0.1 Metodologia della ricerca<br>FASE 1 – Istruttoria e Analitica<br>FASE 2 – Valutativo-Interpretativa<br>FASE 3 – Sintetico-Propositiva<br>FASE 4 – Sperimentale-Applicativa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| p. 27             | 0.2 Struttura della ricerca<br>CAPITOLO 1 - Quadro di riferimento della ricerca<br>CAPITOLO 2 – Passive cooling system<br>CAPITOLO 3 - Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS)<br>CAPITOLO 4 - ANALISI DEI CASI STUDI: Progetti e Sistemi applicativi del TLVS<br>CAPITOLO 5 - ANALISI DI MERCATO: Classificazione e analisi dei prodotti costitutivi del TLVS<br>CAPITOLO 6 - Simulazioni come strumento di analisi : Caso Pilota “progetto ROME TECHNOPOLE”<br>CAPITOLO 7 - Conclusioni e prospettive future                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| p. 30             | 0.3 Domande di ricerca                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| p. 33             | 0.4 Obiettivi e Soluzioni della ricerca                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| p. 35             | 0.5 Risultati                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| p. 37             | 0.6 Destinatari della ricerca                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| p. 38             | 0.7 Organizzazione della ricerca e struttura della tesi<br>Collaborazione a corsi di insegnamento universitari<br>Attività scientifica e di ricerca<br>Partecipazione in qualità di relatore a convegni e seminari<br>Programma di Dottorato internazionale<br>Seminari scientifici e corsi di formazione specialistica frequentati nell’ambito del Dottorato<br>Workshop scientifici e attività laboratoriali di carattere progettuale e interdisciplinare<br>Partecipazione a convegni, forum e incontri di approfondimento scientifico<br>Cerimonie accademiche e giornate istituzionali del Dottorato<br>Riunioni di coordinamento scientifico e attività dei tavoli tematici del Progetto Rome Technopole<br>Attività di pubblicazione scientifica svolta durante il dottorato |
| <b>PARTE I</b>    | <b>CONTESTO DI RIFERIMENTO SCIENTIFICO E CULTURALE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>CAPITOLO 1</b> | <b>QUADRO DI RIFERIMENTO DELLA RICERCA: transizione energetica, crisi climatica e ruolo del raffrescamento passivo nell’ambiente costruito</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| p. 49             | 1.1 Il contesto culturale e legislativo in ambito internazionale<br>1.1.1 Transizione energetica, crisi climatica e centralità del raffrescamento nel settore edilizio<br>1.1.2 Il raffrescamento nel contesto della crisi climatica: politiche, consumi energetici                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| p. 59             | 1.2 Quadro globale di riferimento: Agenda 2030 e Obiettivi di Sviluppo Sostenibile<br>1.2.1 L’Accordo di Parigi (2015): quadro multilaterale di riferimento per la mitigazione climatica e la decarbonizzazione dei sistemi energetici e dell’ambiente costruito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       | 1.2.2 Gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile come cornice operativa per l'energia, la città e l'azione climatica                                                                                                                                                                                                                               |
|       | 1.2.2.1 SDG's 7 - Energia pulita e accessibile                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|       | 1.2.2.2 SDG's 11 - Città e comunità sostenibili                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|       | 1.2.2.3 SDG's 13 - Lotta contro il cambiamento climatico                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| p. 68 | <b>1.3 Iniziative globali per il clima, l'energia e il raffrescamento sostenibile: accordi, impegni e piattaforme di cooperazione</b>                                                                                                                                                                                                         |
|       | 1.3.1 Clean Cooling Coalition (2017): piattaforma di advocacy e cooperazione industriale per la transizione verso sistemi di raffrescamento a basso impatto climatico                                                                                                                                                                         |
|       | 1.3.2 Global Cooling Watch (2021): piattaforma analitica e di monitoraggio per la valutazione della domanda di raffrescamento, delle emissioni e degli scenari futuri                                                                                                                                                                         |
|       | 1.3.3 Global Cooling Pledge (2023): impegno politico multilaterale per la riduzione strutturale delle emissioni da raffrescamento attraverso efficienza, load reduction e soluzioni passive                                                                                                                                                   |
| p. 73 | <b>1.4 Strategie europee per la transizione energetica e climatica</b>                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|       | 1.4.1 Green Deal europeo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|       | 1.4.1.1 La strategia climatica del Green Deal europeo                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|       | 1.4.1.2 La strategia energetica del Green Deal europeo                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| p. 77 | <b>1.5 Dalle strategie alle norme: il pacchetto legislativo UE per il clima e l'energia (Fit for 55)</b>                                                                                                                                                                                                                                      |
|       | 1.5.1 Regolazione del settore edilizio: evoluzione della Direttiva sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD – Energy Performance of Buildings Directive) e quadro prestazionale degli edifici (EPBD dal 2010 al recast 2024- Direttiva Case Green 24 aprile)                                                                          |
| p. 82 | <b>1.6 Il contesto culturale e legislativo della ricerca in ambito nazionale (PNIEC e PNRR)</b>                                                                                                                                                                                                                                               |
|       | 1.6.1 Il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC)                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|       | 1.6.2 Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|       | 1.6.2.1 La Missione 2: "Rivoluzione Verde e Transizione Ecologica"                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| p. 88 | <b>1.7 Norme quadro di riferimento Nazionale</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|       | 1.7.1 UNI EN ISO 52016-1:2018 - Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo                                                                                                                    |
|       | 1.7.2.1 UNI EN 16798-1:2019 - Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica |
|       | 1.7.2.2 UNI EN 16798-7:2018 - Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 7: Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici compresa l'infiltrazione                                                                                                                              |
|       | 1.7.3 UNI EN 15242:2008 - Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni                                                                                                                                                                                  |
|       | 1.7.4 La serie UNI 10349: dati climatici di riferimento per la valutazione termo-energetica degli edifici                                                                                                                                                                                                                                     |
|       | 1.7.4.1 UNI 10349-1 UNI 10349-1:2016 - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione                                                                                   |

diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata

1.7.4.2 UNI/TR 10349-2:2016 - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto

1.7.4.3 UNI 10349-3:2016 - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici

1.7.5 UNI/TS 13370:2018 - Prestazione termica degli edifici – Trasferimento di calore attraverso il terreno – Metodi di calcolo

1.7.6 UNI/TS 11300 - Valutazione della prestazione energetica degli edifici

1.7.7 UNI EN ISO 13790:2008 - Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento

1.7.8 UNI EN 12792:2005 - Ventilazione degli edifici - Simboli, terminologia e simboli grafici

p. 109 1.8 Quadro degli strumenti di valutazione della sostenibilità degli edifici di nuova costruzione in ambito mediterraneo: protocollo LEED, BREEAM ed ITACA.

1.8.1 - LEED v4 / v4.1 Building Design + Construction (BD+C)

1.8.2 - BREEAM NC V7 - New Construction Version 7 (Market—UK & Europe)

1.8.3 - Protocollo ITACA

1.8.4 - Confronto tra i protocolli LEED, BREEAM e ITACA

p. 116 1.9 Il contesto clima e ambientale del bacino mediterraneo

1.9.1 Il sistema di classificazione climatica di Köppen-Geiger

1.9.2 Il Clima Mediterraneo

1.9.3 Fasce climatiche italiane

1.9.4 Situazione attuale: Transizione climatica globale secondo la classificazione Köppen-Geiger

p. 123 1.10 Conclusioni e riflessioni

p. 126 *References*

## CAPITOLO 2 PASSIVE COOLING SYSTEM

p. 135 2.1 Passive cooling systems: principi e ruolo dei sistemi di raffrescamento passivo nell'architettura bioclimatica

2.1.1 Evoluzione dei sistemi di raffrescamento passivo: dalle soluzioni tradizionali dell'antichità alle tecnologie innovative contemporanee

2.1.2 Principi generali del raffrescamento passivo: Il ruolo dei dissipatori naturali nella progettazione bioclimatica

p. 145 2.2 Metodologie di raffrescamento passivo: criteri di classificazione e principi operativi

2.2.1 Raffrescamento ventilativo

2.2.1.1 Ventilazione su un solo lato (ventilazione unilaterale)

2.2.1.2 Ventilazione a flusso incrociato (Cross ventilation)

2.2.1.3 Ventilazione a flusso misto

2.2.1.4 Raffrescamento ventilato notturno

2.2.2 Raffrescamento radiante

2.2.3 Raffrescamento evaporativo

2.2.3.1 Raffrescamento evaporativo diretto

2.2.3.2 Raffrescamento evaporativo indiretto



|        |                                                     |
|--------|-----------------------------------------------------|
|        | 2.2.4 Raffrescamento geotermico                     |
|        | 2.2.4.1 Scambiatori di calore terra-aria            |
|        | 2.2.4.2 Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) |
|        | 2.2.5 Dispositivo di sfasamento termico             |
| p. 166 | 2.3 Conclusioni e riflessioni <i>References</i>     |
| p. 168 | <i>References</i>                                   |

## **PARTE II OBIETTIVI DI PROGETTAZIONE, STRATEGIE, INDICATORI, CASI DI STUDIO E PRODOTTI DEI COMPONENTI**

### **CAPITOLO 3 THERMAL LABYRINTH VENTILATION SYSTEM (TLVS)**

|        |                                                                             |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------|
| p. 181 | 3.1. Descrizione generale e principi di funzionamento                       |
| p. 184 | 3.2 Obiettivi e finalità del sistema                                        |
| p. 186 | 3.3 Caratteristiche costruttive e funzionali                                |
|        | 3.3.1 Tipologie e configurazioni architettoniche                            |
|        | 3.3.2 Componenti principali e materiali impiegati                           |
|        | 3.3.3 Parametri di progettazione e dimensionamento                          |
|        | 3.3.3.1 Parametri fisico-tecnici                                            |
|        | 3.3.3.2 Parametri termo-ambientali e prestazioni stagionali                 |
|        | 3.3.3.3 Parametri economici ed energetici                                   |
|        | 3.3.3.4 Parametri funzionali e tipologici                                   |
| p. 196 | 3.4 Valenze e criticità operative del TLVS                                  |
|        | 3.4.1 Efficienza termica e prestazioni energetiche                          |
|        | 3.4.2 Problematiche igrotermiche nei locali ipogei: condensa e ventilazione |
|        | 3.4.3 Gestione igienico-sanitaria e controllo batteriologico                |
| p. 206 | 3.5 Aspetti economici e gestionali                                          |
|        | 3.5.1 Costi, tempi realizzativi e di ammortamento                           |
| p. 208 | <i>References</i>                                                           |

### **CAPITOLO 4 ANALISI DEI CASI STUDI: Progetti e Sistemi applicativi del TLVS**

|        |                                                                                         |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| p. 215 | 4.1 Criteri di selezione, metodologia e introduzione alla schedatura dei casi di studio |
| p. 217 | 4.2 Elenco dei 100 casi di studio                                                       |
| p. 219 | 4.3 Struttura delle schede e criteri di analisi                                         |
| p. 224 | 4.4 Elenco dei 14 casi di studio selezionati                                            |
|        | The Great Hall, Kent College, Hazle McCormack Young LLP                                 |
|        | Ewha Womans University Campus Complex, D. Perrault, Seoul, Corea del Sud                |
|        | National Renewable Energy Laboratory (NREL), RNL Design, Golden, Stati Uniti            |
|        | Planet Earth Gallery, Feilden Clegg Bradley Studios, Doncaster, Regno Unito             |
|        | Nanaimo Regional General Hospital, Stantec, Isola di Vancouver, Canada                  |
|        | Sede centrale Turkish Contractors Association AVCI ARCHITECTS, Ankara, Turchia          |
|        | Big Data Institute (BDI), Make Architects, Oxford, Regno Unito                          |
|        | Museo commemorativo di Biggin Hill, Robin Lee Architecture, Bromley, Regno Unito        |
|        | Unisphere, EwingCole + Atelier ten, Silver Spring, MD, Stati Uniti                      |
|        | Federation Square, Bates Smart e LAB Architecture Studio, Melbourne, Australia          |
|        | Alpine House, Royal Botanic Gardens, Wilkinson Eyre Architects, Richmond, Regno Unito   |
|        | Surry Hills Library and Community Centre, FJMT, Sydney, Australia                       |

Energy Academy Europe, Broekbakema + De Unie Architecten, Groningen, Paesi Bassi  
POSCO Green building, Centro per la Ricerca sull'Architettura Eco-Sostenibile dell'Università di Yonsei, Incheon, New Songdo, Repubblica della Corea

- p. 282 4.5 Elaborazione dati giunti dalla raccolta dati e dall'analisi dei casi di studio
- 4.5.1 Localizzazione geografica dei casi studio analizzati
  - 4.5.2 Localizzazione climatica dei casi studio analizzati
  - 4.5.3 Localizzazione climatica dei quattro principali parametri scelti dei casi studio analizzati
  - 4.5.4 Confronto tra le condizioni climatiche dei casi studio e quelle del contesto romano: riflessioni e implicazioni
  - 4.5.5 Confronto e considerazioni sulle soluzioni emerse dall'approfondimento dei Casi Studio in relazione al sistema TLVS
- p. 290 4.6 Inquadramento metodologico e riferimento al progetto PRIN 2022
- 4.6.1 Classificazione delle famiglie di sistemi tecnologico-ambientali e costruzione della matrice comparativa
    - PRA\_1 – Sistemi passivi di raffrescamento e ventilazione naturale
    - PRI\_1 – Sistemi di guadagno solare
    - PRA\_2 – Sistemi di ombreggiamento
    - PRI\_2 – Sistemi di accumulo termico
    - SI – Sistemi impiantistici
  - 4.6.2 Costruzione della matrice comparativa dei sistemi tecnologico-ambientali nei casi studio analizzati
- p. 300 *References*

## CAPITOLO 5 ANALISI DI MERCATO: Classificazione e analisi dei prodotti costitutivi del TLVS

- p. 309 5.1 Sistematizzazione tecnico-prestazionale e analisi della componentistica del TLVS
- p. 311 5.2 Componentistica attiva, passiva ed ibrida del TLVS
- 5.2.1 Componenti passivi del sistema
  - 5.2.2 Componenti attiva del sistema
  - 5.2.3 Scelta delle componenti: Il ruolo dei sistemi passivi nella strategia bioclimatica
- p. 315 5.3 Classificazione tecnologica del TLVS secondo la UNI 8290-1:1981
- 5.3.1 Torre di aspirazione dell'aria esterna (CLaTa – 3.5.1.3.01)
  - 5.3.2 Massa termica (CLaC – 3.1.2.1.01)
  - 5.3.3 Matrice-forma (texture e rilievi superficiali del calcestruzzo) (CLaMtf – 3.1.2.1.11)
  - 5.3.4 Sistema di filtraggio aria (CLaFa – 3.5.1.4.02)
  - 5.3.5 Componenti e membrane anti-radon (CLaR – 3.2.2.1.02)
- p. 320 5.4 Schede dei prodotti: metodologia di raccolta e strutturazione delle informazioni di mercato
- 5.4.1 Classificazione e sistematizzazione dei prodotti: schede dei prodotti
    - 5.4.1.1 Composizione delle schede dei prodotti: scheda n.1
    - 5.4.1.2 Composizione delle schede dei prodotti: scheda n.2
- p. 334 5.5 Identificazione delle classi di esigenza secondo la UNI 8289:1981
- 5.5.1 Valutazione comparativa dei prodotti delle Intake Towers (CLaTa)
  - 5.5.2 Valutazione comparativa dei prodotti della Massa Termica (CLaC)
  - 5.5.3 Valutazione comparativa dei prodotti della Matrice-forma (CLaMtf)

|        |                                                                                                       |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | 5.5.4 Sistema di filtraggio aria (CLaFa)                                                              |
|        | 5.5.4.1 Scelta dei filtri d'aria                                                                      |
|        | 5.5.4.2 Valutazione comparativa dei prodotti del Sistema di filtraggio aria (CLaFa)                   |
|        | 5.5.5 Valutazione comparativa dei prodotti delle membrane anti-radon per il solaio controterra (CLaR) |
| p. 354 | 5.6 Conclusioni e riflessioni                                                                         |
| p. 355 | <i>References</i>                                                                                     |
| p. 356 | <i>References Schede Prodotti</i>                                                                     |

### **PARTE III COSTRUZIONE DI STRUMENTI E SIMULAZIONI PROGETTO PILOTA**

#### **CAPITOLO 6 SIMULAZIONI COME STRUMENTO DI ANALISI: CASO PILOTA ROME TECHNOPOLE**

|        |                                                                                                   |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| p. 363 | 6.0 Metodologia di analisi e modellazione del TLVS nel caso pilota Rome Technopole                |
| p. 364 | 6.1 Inquadramento generale del caso pilota                                                        |
|        | 6.1.1 Inquadramento e Stato di Fatto                                                              |
|        | 6.1.2 Inquadramento geologico                                                                     |
|        | 6.1.3 Assetto urbano e spazi aperti                                                               |
|        | 6.1.4 Strategie integrate per la sostenibilità e l'efficienza                                     |
|        | 6.1.5 Organizzazione planimetrica e distribuzione funzionale                                      |
|        | 6.1.6 Sistema di involucro e facciate                                                             |
|        | 6.1.7 Quadro dei dispositivi passivi                                                              |
| p. 374 | 6.2 Condizioni climatiche e microclimatiche di riferimento della zona di Pietralata, Roma         |
|        | Regime anemologico                                                                                |
|        | Regime delle precipitazioni                                                                       |
|        | Regime termico e temperature massime                                                              |
|        | Ondate di calore e temperature minime                                                             |
|        | Gradi giorno di crescita e sviluppo stagionale della vegetazione                                  |
|        | Umidità e condizioni di comfort igrometrico                                                       |
|        | Umidità del sotto suolo                                                                           |
|        | Temperatura del sotto suolo                                                                       |
| p. 384 | 6.3 Calcolo della portata d'aria utile alla modellazione del TLVS                                 |
|        | 6.3.1. Aerazione, ventilazione e qualità dell'aria                                                |
|        | 6.3.2 Benessere termico                                                                           |
|        | 6.3.3 Carichi termici estivi                                                                      |
|        | 6.3.4 Calcolo della portata d'aria                                                                |
| p. 390 | 6.4 Concetto della fluidodinamica (computing fluid-dynamics, CFD)                                 |
| p. 393 | 6.5 Selezione dei parametri per la modellazione e le simulazioni                                  |
|        | Parametri geometrici del TLVS                                                                     |
|        | Parametri relativi al terreno                                                                     |
|        | Parametri fluidodinamici dell'aria                                                                |
|        | Parametri termo-ambientali dell'aria                                                              |
|        | Parametri termo-fisici dei materiali del sistema                                                  |
|        | 6.5.1 Definizione della geometria e delle condizioni al contorno (Geometry & Boundary Conditions) |
|        | 6.5.1.1 Fase 1.1 – Raccolta dei dati climatici per l'analisi microclimatica                       |
|        | 6.5.1.2 Fase 1.2 – Impostazione della geometria del modello per l'analisi microcli-               |

|        |                                                                                                                              |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | matica                                                                                                                       |
|        | 6.5.2 Generazione della mesh (Mesh Generation)                                                                               |
|        | 6.5.3 Impostazione ed esecuzione del solutore (Solver Setup & Run)                                                           |
|        | 6.5.4 Post-processing e analisi dei risultati (Post-Processing)                                                              |
|        | 6.5.5 Grafici dei profili longitudinali di velocità dell'aria, pressione e temperatura lungo il condotto                     |
| p. 405 | <b>6.6 Simulazioni CFD: costruzione del baseline model</b>                                                                   |
|        | Matrice delle simulazioni iniziali per l'ottimizzazione del TLVS                                                             |
|        | Parametri di simulazione                                                                                                     |
| p. 408 | <b>6.7 Simulazioni CFD: Fase A _ variazione della geometria</b>                                                              |
|        | Caso A1_L30_W2_H2                                                                                                            |
|        | Caso A2_L30_W2.5_H2.5                                                                                                        |
|        | Caso A3_L30_W3_H2.5                                                                                                          |
|        | Caso A4_L50_W2_H2                                                                                                            |
|        | Caso A5_L50_W2.5_H2.5                                                                                                        |
|        | Caso A6_L50_W3_H2.5                                                                                                          |
|        | Caso A7_L80_W2_H2                                                                                                            |
|        | Caso A8_L80_W2.5_H2.5                                                                                                        |
|        | Caso A9_L80_W3_H2.5                                                                                                          |
|        | 6.7.1. Sintesi interpretativa delle simulazioni geometriche e individuazione dei casi ottimali                               |
| p. 420 | <b>6.8 Simulazioni CFD: Fase B _ variazione della velocità dell'aria sui casi migliori</b>                                   |
|        | Caso B1_L30_W2_H2_V0.3                                                                                                       |
|        | Caso B2_L30_W2_H2_V0.5                                                                                                       |
|        | Caso B3_L30_W2_H2_V1                                                                                                         |
|        | 6.8.1 Influenza della velocità di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi B1-B2-B3)      |
|        | Caso B4_L50_W2_H2_V0.3                                                                                                       |
|        | Caso B5_L50_W2_H2_V0.5                                                                                                       |
|        | Caso B6_L50_W2_H2_V1                                                                                                         |
|        | 6.8.2 Influenza della velocità di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi B4-B5-B6)      |
|        | Caso B7_L80_W2_H2_V0.3                                                                                                       |
|        | Caso B8_L80_W2_H2_V0.5                                                                                                       |
|        | Caso B9_L80_W2_H2_V1                                                                                                         |
|        | 6.8.3 Influenza della velocità di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi B7-B8-B9)      |
|        | 6.8.4. Analisi conclusiva dell'influenza della velocità e individuazione dei casi ottimali                                   |
| p. 440 | <b>6.9 Simulazioni CFD: Fase C _ variazione delle aperture per l'ingresso e l'uscita del flusso d'aria sui casi migliori</b> |
|        | Caso C1_L80_W2_H2_V0.3_A1                                                                                                    |
|        | Caso C2_L80_W2_H2_V0.3_A2                                                                                                    |
|        | Caso C3_L80_W2_H2_V0.3_A4                                                                                                    |
|        | 6.9.1 Influenza dell'apertura di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi C1-C2-C3)       |
|        | Caso C4_L80_W2_H2_V0.5_A1                                                                                                    |

|                   |                                                                                                                                                                    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | Caso C5_L80_W2_H2_V0.5_A2                                                                                                                                          |
|                   | Caso C6_L80_W2_H2_V0.5_A4                                                                                                                                          |
|                   | 6.9.2 Influenza dell'apertura di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi C4–C5–C6)                                             |
|                   | Caso C7_L80_W2_H2_V1_A1                                                                                                                                            |
|                   | Caso C8_L80_W2_H2_V1_A2                                                                                                                                            |
|                   | Caso C9_L80_W2_H2_V1_A4                                                                                                                                            |
|                   | 6.9.3 Influenza dell'apertura di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi C7–C8–C9)                                             |
|                   | 6.9.4 Analisi conclusiva dell'influenza delle aperture e delle condizioni operative                                                                                |
| p. 461            | <b>6.10 Simulazioni CFD del sistema TLVS a configurazione labirintica</b>                                                                                          |
|                   | 6.10.1 Fase D – Introduzione della configurazione labirintica di base                                                                                              |
|                   | Caso D_C2_L1                                                                                                                                                       |
|                   | Caso D_C2_L2                                                                                                                                                       |
|                   | Caso D_C2_L3                                                                                                                                                       |
|                   | 6.10.1.1 Analisi comparativa dell'andamento longitudinale delle grandezze termo-fluidodinamiche nella configurazione labirintica (casi D_C2_L1, D_C2_L2 e D_C2_L3) |
|                   | 6.10.1.2 Analisi dei risultati termo-fluidodinamici delle configurazioni labirintiche (Fase D)                                                                     |
|                   | 6.10.2 Fase E – Variazione spessore setti                                                                                                                          |
|                   | Casi E_C2_L1_T1 - E_C2_L1_T2 - E_C2_L1_T3                                                                                                                          |
|                   | Casi E_C2_L2_T1 - E_C2_L2_T2 - E_C2_L2_T3                                                                                                                          |
|                   | Casi E_C2_L3_T1 - E_C2_L3_T2 - E_C2_L3_T3                                                                                                                          |
|                   | 6.10.2.1 Valutazione critica dell'influenza dello spessore dei setti e individuazione delle configurazioni ottimali                                                |
|                   | 6.10.3 Fase F – Variazione della distanza tra i setti                                                                                                              |
|                   | Casi F_C2_L1_N1, F_C2_L1_N2 e F_C2_L1_N3                                                                                                                           |
|                   | Casi F_C2_L2_N2, F_C2_L2_N3 e F_C2_L2_N4                                                                                                                           |
|                   | Casi F_C2_L3_N3, F_C2_L3_N4 e F_C2_L3_N5                                                                                                                           |
|                   | 6.10.3.1 Valutazione critica dell'influenza della distanza tra i setti e individuazione delle configurazioni ottimali                                              |
| p. 497            | <b>6.11 Conclusioni delle Simulazioni CFD del sistema TLVS</b>                                                                                                     |
| p. 502            | <b>6.12 Simulazioni CDF: Fase x_influenza della morfologia delle superfici interne del sistema TLVS</b>                                                            |
| p. 507            | <b>6.13 Configurazione ottimale del TLVS e integrazione nel sistema di ventilazione dell'edificio del caso pilota</b>                                              |
| p. 513            | <i>References</i>                                                                                                                                                  |
| <b>PARTE IV</b>   | <b>CONCLUSIONI</b>                                                                                                                                                 |
| <b>CAPITOLO 7</b> | <b>CONCLUSIONI, OUTPUT DELLA RICERCA E PROSPETTIVE FUTURE</b>                                                                                                      |
| p. 519            | 7.1 Conclusioni e output della ricerca                                                                                                                             |
| p. 522            | 7.2 Prospettive future di ricerca                                                                                                                                  |
| p.525             | Appendice                                                                                                                                                          |

## Glossario

### Adattamento climatico

Insieme di strategie e misure finalizzate a ridurre la vulnerabilità degli edifici e delle città agli effetti del cambiamento climatico, in particolare all'aumento delle temperature estive e delle ondate di calore [IPCC, 2022; EPBD recast 2024]

### Ambiente non climatizzato

Spazio edilizio non soggetto a controllo attivo della temperatura interna [UNI EN ISO 52016-1]

### Ambiente termicamente climatizzato

Spazio chiuso in cui la temperatura interna è mantenuta entro valori prefissati mediante sistemi tecnici di riscaldamento o raffrescamento [UNI EN ISO 52016-1]

### Architettura bioclimatica

Approccio progettuale che integra fattori climatici, ambientali e fisici nella configurazione dell'edificio al fine di ridurre il fabbisogno energetico e migliorare il comfort indoor [Olgay, 1963; UNI EN 16798-1:2019]

### Attenuazione dell'onda termica

Riduzione dell'ampiezza della variazione di temperatura attraverso un elemento costruttivo [UNI EN ISO 13786]

### Bilancio energetico dell'edificio

Equilibrio tra apporti termici interni ed esterni e dispersioni attraverso l'involucro e la ventilazione [UNI EN ISO 52016-1]

### Carichi termici latenti

Quota di carico termico associata alla variazione del contenuto di umidità dell'aria [UNI EN ISO 52016-1]

### Carichi termici sensibili

Quota di carico termico associata alla variazione della temperatura dell'aria senza cambiamento di stato [UNI EN ISO 52016-1]

### Carico termico di progetto

Valore massimo della potenza termica richiesta in condizioni climatiche di progetto per garantire le condizioni interne previste [UNI/TR 10349-2]

### Climatizzazione estiva

Processo di raffrescamento e controllo termo-igrometrico degli ambienti interni durante la stagione calda [UNI/TS 11300-1]

### Comfort termo-igrometrico

Condizione di benessere determinata dalla combinazione di temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa e velocità dell'aria [UNI EN ISO 52016-1:2018; UNI EN 16798-1:2019]

### Decarbonizzazione

Processo di riduzione progressiva delle emissioni di CO<sub>2</sub> associate ai consumi energetici, con l'obiettivo della neutralità climatica [Accordo di Parigi, 2015; Green Deal Europeo]

### Domanda di raffrescamento

Quantità di energia richiesta per mantenere condizioni interne di comfort durante la stagione estiva [IEA, 2023; EPBD recast 2024]

### Efficienza energetica

Rapporto tra prestazione energetica ottenuta e quantità di energia impiegata, finalizzato alla riduzione dei consumi e delle emissioni [Direttiva 2012/27/UE; UNI/TS 11300]

### Fabbisogno energetico estivo

Energia necessaria per compensare i carichi termici interni ed esterni durante la stagione calda [UNI EN ISO 52016-1:2018]

### Fabbisogno di energia per il raffrescamento

Energia necessaria per mantenere la temperatura interna entro i limiti di progetto durante la stagione estiva [UNI EN ISO 52016-1]

### Fabbisogno di energia primaria

Energia richiesta per coprire i fabbisogni energetici dell'edificio, considerando le perdite di generazione, distribuzione e conversione [UNI/TS 11300-2]

### Inerzia termica

Capacità di un elemento costruttivo di accumulare e rilasciare calore nel tempo, contribuendo allo sfasamento e all'attenuazione delle oscillazioni termiche [UNI EN ISO 13786; UNI/TS 11300-1]

### Infiltrazione

Flusso d'aria non controllato che attraversa l'involucro edilizio per effetto di differenze di pressione [UNI EN 16798-7]

### Integrazione architettonica

Processo di inserimento coerente di un sistema tecnologico all'interno della configurazione spaziale e costruttiva dell'edificio [UNI 8290-1:1981]

### Involucro edilizio

Insieme degli elementi che delimitano lo spazio climatizzato rispetto all'ambiente esterno o non climatizzato [UNI EN ISO 52016-1]

### Irradianza solare

Potenza della radiazione solare incidente su una superficie per unità di area [UNI 10349-1]

### Massa termica

Capacità di un elemento costruttivo di accumulare energia termica e rilasciarla nel tempo [UNI EN ISO 52016-1]

### Mitigazione del surriscaldamento

Riduzione dei picchi termici estivi mediante strategie passive o ibride [IPCC, 2022; EPBD recast 2024]

### Neutralità climatica

Condizione in cui le emissioni nette di gas serra sono pari a zero su base annuale [Agenda 2030; European Green Deal]

### NZEB (Nearly Zero Energy Building)

Edificio ad altissima prestazione energetica con fabbisogno molto basso coperto in larga parte da fonti rinnovabili [Direttiva 2010/31/UE; EPBD]

### Perdita di carico

Riduzione della pressione lungo un condotto dovuta all'attrito e ai fenomeni di turbolenza del fluido [UNI EN 16798-7]

### Portata d'aria di ventilazione

Volume d'aria immesso o estratto per unità di tempo in uno spazio interno [UNI EN 16798-7]

### Prestazione energetica dell'edificio

Quantità di energia necessaria per soddisfare i fabbisogni energetici associati a un



uso standard dell'edificio [EPBD; UNI/TS 11300]

### Raffrescamento passivo

Insieme di strategie progettuali che riducono la temperatura interna senza l'impiego prevalente di sistemi meccanici attivi [Santamouris, 2016; UNI EN ISO 52016-1]

### Raffrescamento ventilativo

Strategia basata sull'incremento controllato del ricambio d'aria per dissipare calore sensibile [UNI EN 16798-7:2018]

### Recupero di calore

Trasferimento di energia termica dall'aria espulsa all'aria di rinnovo mediante dispositivi di scambio [UNI EN 16798-7]

### Scambio termico convettivo

Trasferimento di calore tra una superficie solida e un fluido in movimento [UNI EN ISO 52016-1]

### Simulazione energetica dinamica

Metodo di calcolo che considera la variabilità temporale delle condizioni climatiche e dei carichi interni [UNI EN ISO 52016-1]

### Sistema di ventilazione

Sistema destinato a garantire il ricambio dell'aria e il controllo della qualità dell'aria interna [UNI EN 12792]

### Sistema ipogeo

Sistema edilizio collocato al di sotto del piano di campagna che sfrutta la stabilità termica del terreno [UNI EN ISO 13370]

### Sistema tecnico per l'edilizia

Insieme di sottosistemi destinati a fornire servizi energetici quali riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e produzione di acqua calda sanitaria [UNI EN ISO 52016-1]

### Sfasamento termico

Intervallo temporale tra il picco di temperatura esterna e il corrispondente picco interno [UNI EN ISO 13786]

### Temperatura operativa

Media ponderata tra temperatura dell'aria e temperatura media radiante utilizzata per la valutazione del comfort [UNI EN 16798-1]

### Transizione energetica

Processo di trasformazione dei sistemi energetici verso modelli a basse emissioni di carbonio e alta efficienza [Agenda 2030; PNIEC; Green Deal Europeo]

### Trasferimento di calore attraverso il terreno

Flusso termico tra edificio e suolo determinato dalla differenza di temperatura e dalle proprietà termiche del terreno [UNI EN ISO 13370]

### Ventilazione meccanica

Sistema di ricambio dell'aria controllato tramite ventilatori e dispositivi impiantistici [UNI EN 12792:2005]

### Ventilazione naturale

Ricambio d'aria ottenuto mediante differenze di pressione e temperatura senza l'impiego di ventilatori meccanici [UNI EN 15242:2008; UNI EN 16798-7:2018]

### Ventilazione notturna

Strategia di raffrescamento passivo che utilizza aria esterna più fresca durante le ore notturne per dissipare il calore accumulato [UNI EN 16798-7:2018]

### Ventilazione ibrida

Sistema che combina ventilazione naturale e meccanica in modo controllato e integrato [UNI EN 16798-1]

### Zona termica

Parte dell'edificio caratterizzata da condizioni ambientali omogenee e controllate in modo unitario [UNI EN ISO 52016-1]

## Abbreviazioni

### Abbreviazioni principali del tema di ricerca

TLVS – Thermal Labyrinth Ventilation System  
NZEB – Nearly Zero Energy Building  
HVAC – Heating, Ventilation and Air Conditioning  
CFD – Computational Fluid Dynamics  
IAQ – Indoor Air Quality  
COP – Coefficient of Performance  
 $\Delta T$  – Differenza di temperatura  
UHI – Urban Heat Island

### Abbreviazioni normative e legislative

EPBD – Energy Performance of Buildings Directive  
PNIEC – Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima  
PNRR – Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza  
SDGs – Sustainable Development Goals  
UNI – Ente Italiano di Normazione  
ISO – International Organization for Standardization  
UNI/TS – Specifica Tecnica UNI  
EN – Norma Europea  
Fit for 55 – Pacchetto climatico europeo

### Abbreviazioni metodologiche e progettuali

PDSF – Performance-Based Design Support Framework  
BPS – Building Performance Simulation  
LCA – Life Cycle Assessment  
KPI – Key Performance Indicator  
GHG – Greenhouse Gases  
GH – Grasshopper  
DB – DesignBuilder

### Abbreviazioni climatiche ed energetiche

$\text{kWh/m}^2 \cdot \text{anno}$  – Chilowattora per metro quadrato anno  
TWh – Terawattora  
GtCO<sub>2</sub> – Gigatonnellate di anidride carbonica  
ACH – Air Changes per Hour  
RH – Relative Humidity

### Abbreviazioni interne di classificazione tecnologica (Capitolo 5)

CLaTa – Torre di aspirazione aria esterna  
CLaC – Massa termica  
CLaMtf – Matrice-forma  
CLaFa – Sistema di filtraggio aria  
CLaR – Membrane anti-radon

## 0.0 Contesto di inquadramento ed individuazione del tema di tesi: borsa Rome Technopole con finanziamento PNRR

1. Agenda di riforme e investimenti post-pandemia finanziata con circa 200 miliardi di Euro nell'ambito del Fondo "Next Generation EU" dove la ricerca è inserita nella Missione 4, Componente 2, Investimento 1.5. dal titolo "Creazione e rafforzamento di ecosistemi dell'innovazione per la sostenibilità".

2. Istituita l'8 giugno 2022, rappresenta l'ecosistema dell'innovazione del Lazio e aggrega tutte le università pubbliche e private della Regione, i principali centri di ricerca nazionali, istituzioni e una vasta rete di imprese. Questa struttura integrata consente di creare una solida piattaforma di collaborazione e crescita tra il mondo accademico, la ricerca e il settore industriale.

3. Unità operative del progetto, ciascuna focalizzata su un'area tematica specifica. Ricerca applicata, sviluppo tecnologico e Innovazione (con un totale di 6 Spoke).

4. Strumenti chiave per realizzare la sua visione di sviluppo, progetti verticali di innovazione, guidati da leader industriali e concepiti all'interno di un ecosistema collaborativo.

5. Tale Spoke si concentra sullo

La presente ricerca si inserisce all'interno del percorso di dottorato mediante una borsa Rome Technopole, finanziata dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza<sup>1</sup> (PNRR). L'individuazione del tema e la definizione degli obiettivi generali sono il risultato di un processo di maturazione scientifica sviluppatasi a partire dalle attività di ricerca condotte sin dall'inizio del dottorato, e rese possibili grazie al diretto coinvolgimento all'interno del gruppo di ricerca partecipante al programma della Fondazione Rome Technopole<sup>2</sup>.

Coordinato per l'Unità Operativa "Sapienza Università di Roma" dal Prof. Arch. Fabrizio Tucci, la Fondazione *Rome Technopole* si configura come una infrastruttura strategica che affronta tematiche relative al sostenimento della transizione energetica, ecologica e digitale. Tale iniziativa si articola in Spoke<sup>3</sup> e Flagship Project<sup>4</sup>, e la presente ricerca si colloca nello Spoke 1<sup>5</sup> e FP2<sup>6</sup>, dal titolo "Transizione energetica e transizione digitale nella rigenerazione urbana e nell'edilizia".

Ulteriormente, il gruppo di ricerca<sup>7</sup> di appartenenza è inserito all'interno del Tavolo 1: Transizione energetica nel progetto multiscale verso la neutralità climatica, con particolare riferimento al Sotto Tavolo 1.2: Aspetti bioclimatici ed energetico-termici passivi e attivi. In tale ambito, l'obiettivo è approfondire e sperimentare tecnologie orientate alla decarbonizzazione del settore edilizio e con caso pilota applicativo il "progetto Rome Technopole", anche attraverso il recupero e l'innovazione di soluzioni bioclimatiche a scala architettonica e urbana.

Tali sistemi si configurano come dispositivi tecnologici strategici per affrontare in modo integrato le sfide della transizione energetica, della mitigazione climatica e dell'adattamento al surriscaldamento estivo, in coerenza con gli obiettivi del PNRR, del PNIEC e dell'Agenda europea per la neutralità climatica.

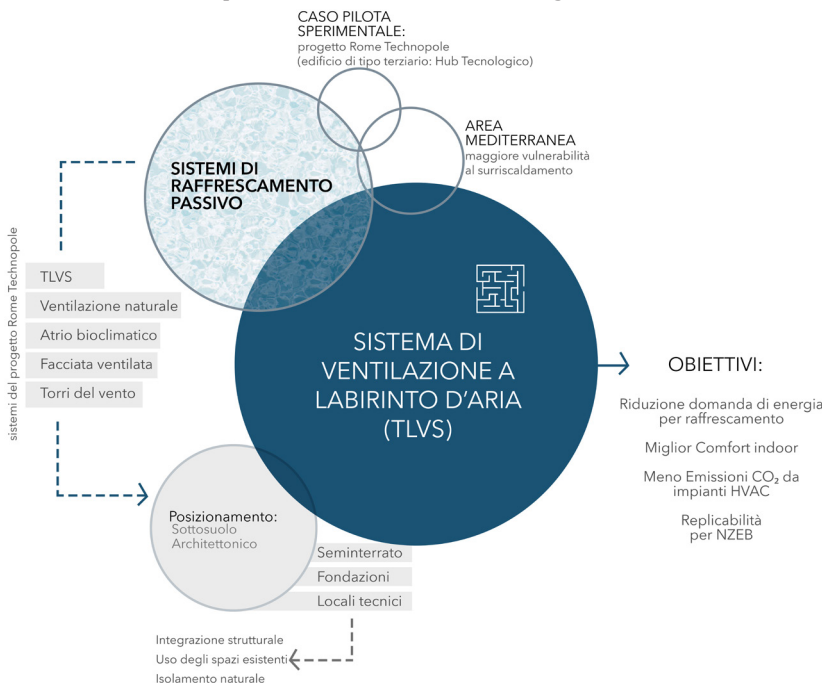
In un contesto in cui la domanda di raffrescamento rappresenta una delle dinamiche più critiche e strutturalmente crescenti dei sistemi energetici contemporanei, l'integrazione di soluzioni passive consente di intervenire alla radice del fabbisogno, ridu-

cendo carichi termici, consumi elettrici e emissioni climalteranti. La ricerca si colloca nel campo della Progettazione Tecnologica Ambientale e affronta in chiave sistemica i temi dell'efficienza energetica, della decarbonizzazione del settore edilizio e dell'adattamento climatico, con un focus specifico sull'integrazione architettonica e prestazionale di sistemi passivi ipogei. In tale prospettiva, il Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) viene analizzato non soltanto come dispositivo di ventilazione naturale, ma come infrastruttura termo-fluidodinamica capace di sfruttare l'inerzia termica del terreno e della massa costruttiva per il pre-raffrescamento dell'aria di rinnovo. Attraverso un approccio che integra analisi normativa, studio comparativo di casi internazionali, classificazione tecnologica, modellazione parametrica e simulazioni dinamiche (CFD ed energy modelling), la tesi indaga il potenziale del TLVS nella riduzione del fabbisogno energetico estivo, nel miglioramento del comfort termoigrometrico indoor e nella costruzione di modelli replicabili per il settore terziario nei climi mediterranei. L'obiettivo è delineare strumenti operativi e criteri prestazionali capaci di supportare la rigenerazione edilizia sostenibile e la diffusione di soluzioni passive scalabili nel quadro della transizione ecologica urbana (*Schema 0.1*).

sviluppo di attività di ricerca industriale e tecnologica con un focus su innovazione e collaborazione tra università, centri di ricerca e imprese. L'obiettivo è trasformare le scoperte accademiche in soluzioni tecnologiche applicabili, valorizzando le infrastrutture di ricerca esistenti e creando sinergie tra istituzioni pubbliche e private.

6. Questo FP si concentra sullo sviluppo e sull'applicazione di tecnologie digitali e verdi alla rigenerazione urbana e alla costruzione di edifici, secondo l'approccio della "città verde" che assume la qualità ecologica come priorità strategica per garantire la sostenibilità e la resilienza dei programmi e dei progetti di intervento nell'era della crisi climatica, della scarsità di suolo e di altre risorse naturali.

7. Il Gruppo di Lavoro dell'Unità Operativa della "Sapienza" Università di Roma, Principal Investigator Prof. F. Tucci è composto dai coordinatori: Prof. Arch. D. D'Olimpio e Prof.ssa Arch. V. Cecafozzo  
Partecipanti: G. Giordani - Roma Tre; Arch. K. Mitrik - Sapienza PDTA; Arch. L. Montagner - Sapienza PDTA; L. Canale - Cassino; M. Barbera - Tuscia; M. Caliano - Enea.



*Schema 0.1* Graficizzazione della tematica di ricerca. Fonte: K. Mitrik

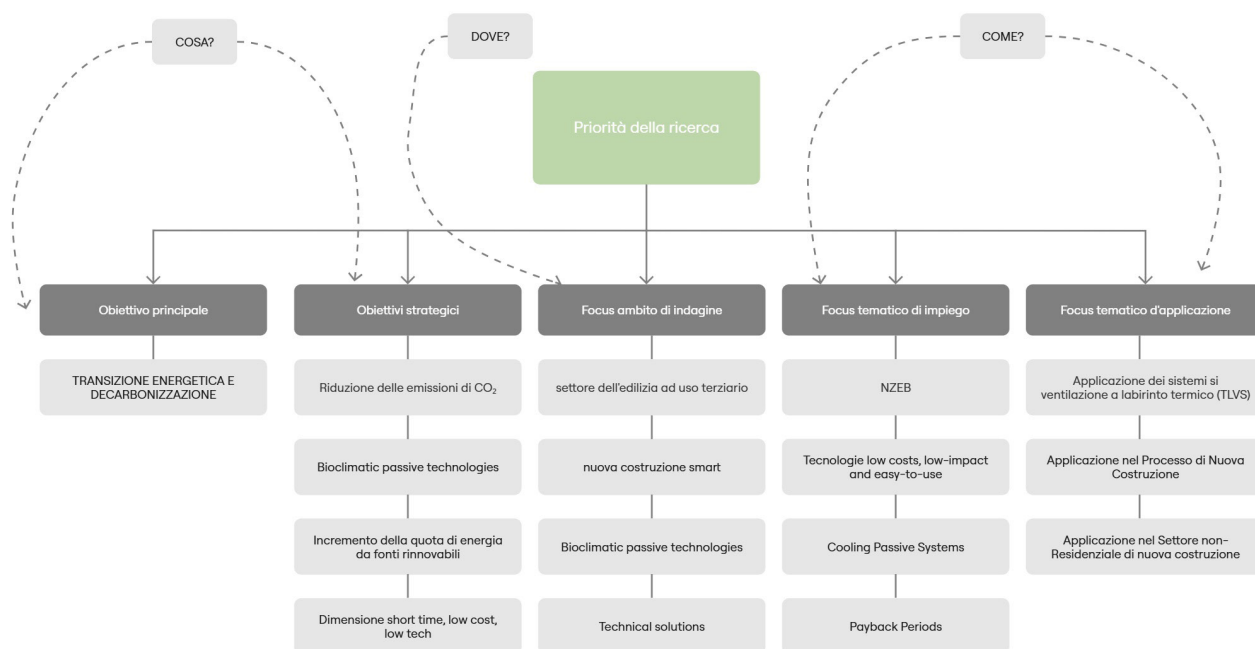
## 0.1 Metodologia della ricerca

Il processo metodologico del progetto di ricerca si articola in quattro fasi:

### FASE 1 – Istruttoria e Analitica

La prima fase della ricerca ha avuto come obiettivo la definizione del quadro tematico di riferimento e delle principali aree di approfondimento. Tale fase si è sviluppata attraverso un'approfondita analisi bibliografica sistematica, mirata alla raccolta, selezione e interpretazione delle fonti scientifiche esistenti sui sistemi di raffrescamento passivo e, in particolare, sulle strategie basate sulla ventilazione naturale. L'elaborazione critica delle informazioni ha consentito la costruzione di un primo impianto teorico-metodologico, volto a individuare lo stato dell'arte e a circoscrivere il campo d'indagine secondo criteri coerenti con il contesto mediterraneo e il settore edilizio terziario.

La fase istruttoria è stata impostata attraverso una matrice di coerenza che ha messo in relazione priorità della ricerca, obiettivi strategici, ambito di indagine e focus applicativo. L'obiettivo principale è stato individuato nella transizione energetica e nella decarbonizzazione del settore edilizio, con particolare attenzione alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e al contenimento della domanda di raffrescamento estivo (*Schema 0.2*). Gli obiettivi strategici hanno incluso l'incremento dell'efficienza energetica, la diffusione di tecnologie bioclimatiche passive e l'adozione di soluzioni tecniche caratterizzate da sostenibilità economica, semplicità costruttiva e replicabilità. L'ambito di indagine è stato circoscritto al settore dell'edilizia terziaria di nuova costruzione, con riferimento agli edifici a energia quasi zero (NZEB) e alle tecnologie di raffrescamento passivo. In tale contesto, il focus applicativo è stato definito nell'integrazione dei sistemi di ventilazione a labirinto termico (Thermal Labyrinth Ventilation System – TLVS) quale soluzione ipogea capace di contribuire alla mitigazione del surriscaldamento estivo. La costruzione del corpus bibliografico è avvenuta mediante un protocollo di revisione strutturato, rappresentato nella *Schema 0.3*, che



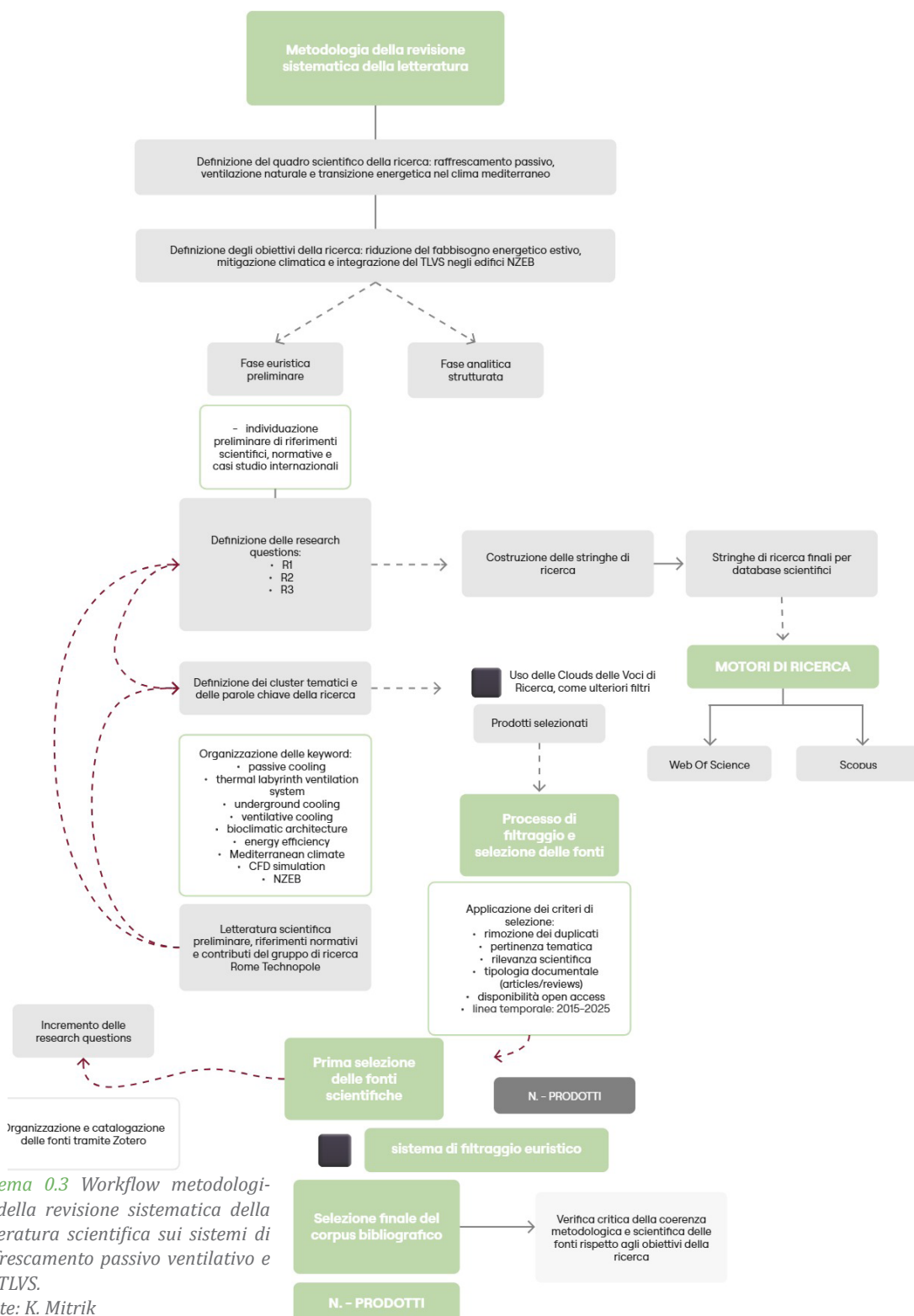
ha integrato una fase euristica preliminare con una formalizzazione analitica delle stringhe di ricerca. A partire dalle domande iniziali, sono stati individuati cluster tematici organizzati in insiemi di parole chiave, successivamente combinati tramite operatori booleani (AND, OR) per la definizione di stringhe complesse e replicabili.

Le interrogazioni sono state condotte sui principali database scientifici internazionali, Web of Science e Scopus, al fine di garantire ampiezza, qualità e tracciabilità delle fonti.

I risultati ottenuti sono stati sottoposti a un processo di filtraggio multilivello comprendente delimitazione temporale, selezione per tipologia documentale (article e review), ambito disciplinare, lingua, open access e rimozione dei contributi duplicati.

La progressiva applicazione dei filtri ha consentito una significativa riduzione del dataset iniziale, orientando la selezione verso contributi pienamente pertinenti rispetto agli obiettivi della ricerca. I documenti selezionati sono stati quindi esportati e organizzati in un database gestionale strutturato per aree tematiche e parole chiave specifiche. La valutazione finale dell'idoneità è stata condotta mediante analisi critica di titolo, abstract, risultati e conclusioni, assicurando coerenza metodologica e solidità scientifica al corpus definitivo.

*Schema 0.2 Workflow della ricerca analitica dei documenti durante la fase istruttoria. Fonte: K. Mitrik*



*Schema 0.3 Workflow metodologico della revisione sistematica della letteratura scientifica sui sistemi di raffrescamento passivo ventilativo e sul TLVS.*

Fonte: K. Mitrik



## **FASE 2 – Valutativo-Interpretativa**

Successivamente, la seconda fase si è concentrata sull'individuazione e l'analisi della tecnologia principale oggetto della tesi, ovvero il Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), approfondendone il funzionamento, le componenti, e i contesti applicativi. In parallelo, è stata condotta un'indagine comparativa su un corpus selezionato di casi studio internazionali, scelti in base a criteri qualitativi e quantitativi, con lo scopo di delineare le condizioni di efficacia dei sistemi di ventilazione passiva. Tale fase ha incluso anche l'elaborazione di schede tecniche dedicate ai principali elementi che compongono il TLVS, valutandone materiali, prestazioni e compatibilità architettonica e climatica. Ne è derivata una mappa critica delle tecnologie e un primo quadro di linee guida operative per la loro selezione nei diversi contesti progettuali.

## **FASE 3 – Sintetico-Propositiva**

La terza fase ha avuto un carattere propositivo, orientato alla definizione di un sistema valutativo strutturato per l'integrazione del TLVS nei progetti edilizi. Sono stati individuati e codificati specifici parametri e indicatori prestazionali – tecnologici, ambientali ed economici – utili alla comparazione tra i dati dei casi studio e le potenzialità delle componenti del sistema TLVS. Questa fase ha condotto alla costruzione di uno strumento di supporto decisionale: un diagramma valutativo dell'integrazione del sistema, utile per orientare la progettazione in funzione dei vincoli e degli obiettivi di sostenibilità. Contestualmente, sono state definite le linee guida operative per l'applicazione dei TLVS in contesti reali, con l'obiettivo di favorire l'effettiva replicabilità della soluzione.

## **FASE 4 – Sperimentale-Applicativa**

Infine, la quarta fase prevede la sperimentazione del sistema all'interno di un caso pilota, identificato nell'edificio del Rome Technopole, che rappresenta un contesto applicativo concreto all'interno del progetto di ricerca finanziato dal PNRR. In questa fase, il sistema TLVS verrà integrato progettualmente e sottoposto a verifica attraverso simulazioni termo-fluidodinamiche (CFD), con l'obiettivo di valutarne l'efficacia in termini di comfort indoor, riduzione del fabbisogno energetico e capacità di mitigazione passiva nella stagione estiva.

I risultati attesi mirano alla validazione scientifica del sistema, evidenziandone la potenzialità di diffusione nell'ambito della rigenerazione edilizia in chiave sostenibile e della transizione energetica urbana (*Schema 0.4-0.5*).

*Nella pagina seguente:*

*Schema 0.4 Rappresentazione schematica della metodologia della Ricerca, suddivisa in Fasi, Strategie, Passaggi Logici e Prodotti.*

*Fonte: K. Mitrik*

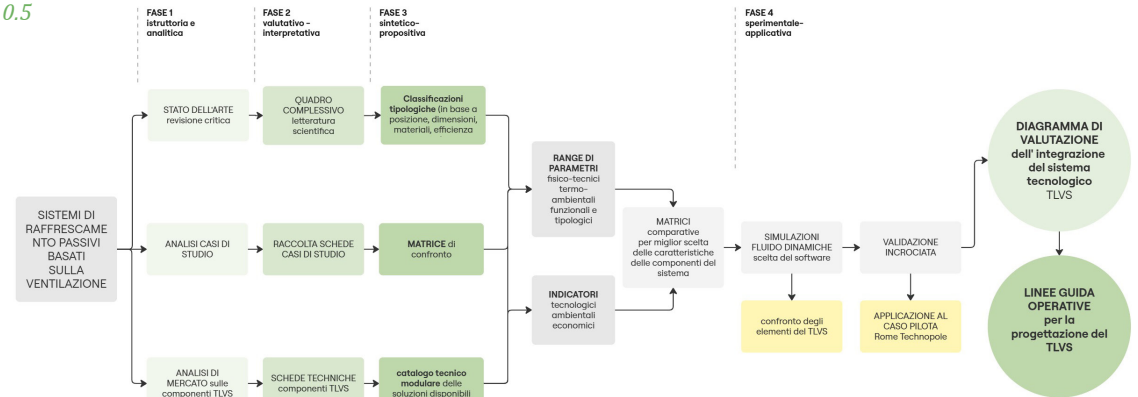
*Schema 0.5 Schema metodologico generale della ricerca.*

*Fonte: K. Mitrik*

0.4

| STRATEGIE                                                                                                                                                                                                                                                                    | PASSAGGI LOGICI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | PRODOTTI                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>FASE 1</b><br/><i>istruttoria e analitica</i></p> <p>SG1.1_ Definizione del quadro tematico e delle aree di approfondimento</p>                                                                                                                                        | <p>PL1.1_ Analisi bibliografica sistematica per la raccolta di dati e fonti sulla letteratura esistente<br/>PL1.2_ Elaborazione critica delle informazioni sui sistemi di raffrescamento passivo</p>                                                                                                                                                               | <p>P1_ Elaborazione di un quadro teorico-metodologico di riferimento sullo stato dell'arte</p>                                                                                                                                                                                     |
| <p><b>FASE 2</b><br/><i>valutativo - interpretativa</i></p> <p>SG2.1_ Individuazione della principale tecnologia: Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS)<br/>SG2.2_ Analisi e confronto critico di casi studio<br/>SG2.3_ Analisi critica delle componenti del TLVS</p> | <p>PL2.1_ Classificazione delle tecnologie di raffrescamento passivo e approfondimento del TLVS<br/>PL2.2_ Definizione di criteri per la selezione dei casi studio rilevanti, attraverso metodologie qualitative e quantitative<br/>PL2.3_ Selezione, descrizione e comparazione tecnica dei principali componenti del sistema TLVS tramite schede di prodotto</p> | <p>P2.1_ Produzione di una mappa critica delle tecnologie e linee guida per la loro selezione in base al contesto applicativo e 10 schede dei casi studio<br/>P2.2_ Schede tecniche dei componenti del TLVS (materiali, prestazioni, compatibilità architettonica e climatica)</p> |
| <p><b>FASE 3</b><br/><i>sintetico - propositiva</i></p> <p>SG3.1_ Elaborazione di PARAMETRI e INDICATORI prestazionali</p>                                                                                                                                                   | <p>PL3.1_ Definizione indicatori tecnologici, ambientali ed economici per la valutazione critica dei casi di studio e dai prodotti delle componenti confrontati coi parametri del TLVS<br/>PL3.2_ DIAGRAMMA DI VALUTAZIONE dell' integrazione del sistema tecnologico TLVS</p>                                                                                     | <p>P3.1_ Parametri specifici<br/>P3.1_ MATRICI COMPARATIVE<br/>P3.2_ LINEE GUIDA OPERATIVE per la progettazione del TLVS</p>                                                                                                                                                       |
| <p><b>FASE 4</b><br/><i>applicativa - sperimentale</i></p> <p>SG4.1_ Sviluppo e verifica di un modello sperimentale basato su caso pilota</p>                                                                                                                                | <p>PL4.1_ Applicazione del sistema su edificio pilota (Rome Technopole)<br/>PL4.2_ Verifica sperimentale e valutazione dei risultati attraverso simulazioni fluidodinamiche CFD</p>                                                                                                                                                                                | <p>P4_ Esiti attesi e validazione dell'efficacia del Thermal Labyrinth Ventilation System</p>                                                                                                                                                                                      |

0.5



## 0.2 Struttura della ricerca

La presente ricerca si articola in sei capitoli, ciascuno dei quali contribuisce in modo integrato alla costruzione di un impianto teorico, metodologico e applicativo volto all'analisi e alla sperimentazione dei sistemi innovativi di raffrescamento passivo, con particolare riferimento al *Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS)* per edifici ad uso terziario nel clima mediterraneo.

Divisione dei Capitoli:

### **CAPITOLO 1 - Quadro di riferimento della ricerca**

Definisce il contesto teorico, normativo e climatico entro cui si colloca la ricerca. Analizza il ruolo crescente del raffrescamento nelle politiche di decarbonizzazione (Agenda 2030, Accordo di Parigi, *Green Deal, Fit for 55*) e l'evoluzione della normativa europea e nazionale (EPBD recast 2024, PNIEC, PNRR). Viene approfondito il peso energetico del settore edilizio, con particolare riferimento agli edifici terziari, e il ruolo strategico del raffrescamento passivo nel clima mediterraneo. Il capitolo dimostra la coerenza della ricerca rispetto agli obiettivi di neutralità climatica e adattamento.

### **CAPITOLO 2 – Passive cooling system**

Analizza i principi e l'evoluzione dei sistemi di raffrescamento passivo, con particolare attenzione alle strategie ventilative. Viene proposta una classificazione critica delle tecnologie (ventilazione naturale, notturna, evaporativa, geotermica, sistemi terra-aria), evidenziandone condizioni climatiche, principi fisici e ambiti applicativi. Il capitolo costruisce la base teorico-tecnica per l'approfondimento del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS).

### **CAPITOLO 3 - Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS)**

Il terzo capitolo è interamente dedicato al Thermal Labyrinth Ventilation System, tecnologia al centro della ricerca. Dopo un inquadramento concettuale e normativo, il capitolo descrive in modo anali-

tico il funzionamento del sistema, le sue componenti principali, le configurazioni possibili, i vantaggi derivanti dall'inerzia termica e dalla ventilazione naturale, ma anche le problematiche igrotermiche e igieniche connesse al suo utilizzo. Si affrontano inoltre aspetti economici (costi, tempi di realizzazione e ammortamento), vincoli architettonici e requisiti ambientali ottimali per il funzionamento del sistema. Infine, viene presentata una sintesi dei risultati emersi dalla letteratura scientifica, utile a definire un primo quadro di valutazione delle prestazioni del TLVS.

#### **CAPITOLO 4 - ANALISI DEI CASI STUDI: Progetti e Sistemi applicativi del TLVS**

Il quarto capitolo ha carattere empirico e presenta un'analisi comparativa di dieci casi studio internazionali in cui sono stati implementati sistemi riconducibili al TLVS o ad esso affini. Ogni progetto è descritto attraverso una scheda tecnica che ne illustra il contesto climatico, le soluzioni adottate, le prestazioni raggiunte e i criteri di integrazione architettonica. I dati raccolti sono successivamente sistematizzati per consentire una riflessione critica sulle condizioni che favoriscono l'efficacia dei sistemi ipogei di ventilazione. L'obiettivo è identificare elementi ricorrenti e buone pratiche che possano essere tradotti in criteri progettuali replicabili e scalabili.

#### **CAPITOLO 5 - ANALISI DI MERCATO: Classificazione e analisi dei prodotti costitutivi del TLVS**

Il capitolo analizza le soluzioni tecnologiche disponibili per la realizzazione del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), verificandone fattibilità tecnica e coerenza prestazionale. Viene proposta una distinzione tra componenti passive (massa termica, geometria del labirinto, torri di captazione), attive (ventilatori, sensori, sistemi di controllo) e sistemi di filtrazione e protezione anti-radon. Il sistema è inquadrato secondo la classificazione UNI 8290 e valutato in relazione alle classi di esigenza della UNI 8289. Attraverso un'analisi comparativa dei prodotti di mercato, sono esaminati parametri quali inerzia termica, perdite di carico, qualità dell'aria, durabilità e compatibilità con ambienti ipogei. Le schede tecniche elaborate costituiscono uno strumento operativo per la selezione consapevole dei componenti. Il capitolo contribuisce così alla standardizzazione e replicabilità del TLVS nei processi di progettazione sostenibile.

## **CAPITOLO 6 - Simulazioni come strumento di analisi : Caso Pilota “progetto ROME TECHNOPOLE”**

Il sesto capitolo rappresenta la fase sperimentale della ricerca e applica il TLVS al caso pilota del Rome Technopole, nel contesto di Pietralata. Dopo l'inquadramento territoriale, geologico e microclimatico dell'area, vengono analizzati ventilazione, qualità dell'aria e carichi termici estivi dell'edificio. Sulla base dei calcoli preliminari necessari per il caso studio, relativi a portate d'aria, fabbisogni di raffrescamento e condizioni climatiche di progetto, viene definito un primo dimensionamento coerente del labirinto termico (geometria, lunghezza dei percorsi, sezione e massa termica). Tale configurazione costituisce la base per la modellazione parametrica in Rhinoceros e Grasshopper, attraverso simulazioni iterative finalizzate all'ottimizzazione geometrica e funzionale del sistema. I risultati consentono di verificare l'efficacia del TLVS nella riduzione dei carichi estivi e di valutarne la replicabilità nel clima mediterraneo.

## **CAPITOLO 7 - Conclusioni e prospettive future**

Il Capitolo 7 illustra le conclusioni della ricerca e le prospettive future, evidenziando come l'integrazione di sistemi di progettazione tecnologico-ambientale, quali il TLVS, possa contribuire in modo concreto alla riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO<sub>2</sub> negli edifici e, più in generale, nei sistemi urbani. In particolare, viene sottolineato come strategie passive basate sulla ventilazione e sullo sfruttamento dell'inerzia termica possano incidere significativamente sul bilancio energetico, pur in presenza di una naturale variabilità delle condizioni di utilizzo degli spazi e delle dinamiche di occupazione, che rendono complessa una quantificazione univoca delle prestazioni. L'analisi consente di individuare i contributi del TLVS nella mitigazione delle emissioni legate al raffrescamento estivo, evidenziando il ruolo del sistema come dispositivo in grado di intervenire preventivamente sui carichi energetici. Ne deriva una sistematizzazione delle strategie progettuali, articolate in indirizzi operativi che supportano l'integrazione del TLVS nei processi di progettazione sostenibile, contribuendo alla riduzione delle emissioni e al raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica.

## 0.3 Domande di ricerca

Il quadro concettuale e metodologico della ricerca, articolato nelle quattro fasi istruttoria–analitica, valutativo–interpretativa, sintetico–propositiva e sperimentale–applicativa, è strutturato attorno a un insieme di Domande di Ricerca (Research Questions – RQ), formulate a partire dai gap emersi nella letteratura scientifica e dalle criticità normative, tecnologiche e applicative relative ai sistemi di raffrescamento passivo basati sulla ventilazione nel contesto mediterraneo. Le domande principali sono articolate in sotto-domande operative, coerenti con gli obiettivi generali e specifici della tesi (*Schema 0.6*).

*RQ1. Quale ruolo può assumere il Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) come strategia di raffrescamento passivo nella transizione energetica degli edifici terziari nel clima mediterraneo?*

1. Quali limiti mostrano le strategie di climatizzazione meccanica convenzionali nel rispondere alla crescente domanda estiva di energia negli edifici non residenziali?
2. In che modo il TLVS si colloca rispetto ad altri sistemi di ventilazione passiva (cross ventilation, night cooling, sistemi aria–terra) in termini di principi fisici, condizioni di efficacia e vincoli di integrazione?
3. Quali condizioni climatiche, tipologiche e funzionali rendono il TLVS particolarmente pertinente nel contesto mediterraneo e nel settore terziario di nuova costruzione?
4. Qual è il potenziale contributo del TLVS in termini di riduzione del fabbisogno energetico estivo e di mitigazione delle emissioni climalteranti?

*RQ2. Quali parametri progettuali e indicatori prestazionali devono essere definiti per valutare, ottimizzare e standardizzare l'integrazione del TLVS negli edifici terziari?*

1. In che modo geometria, dimensionamento e configurazione spaziale del labirinto influenzano le prestazioni termo-fluidodinamiche del sistema?
2. Qual è l'influenza dei materiali ad alta massa termica e delle ca-

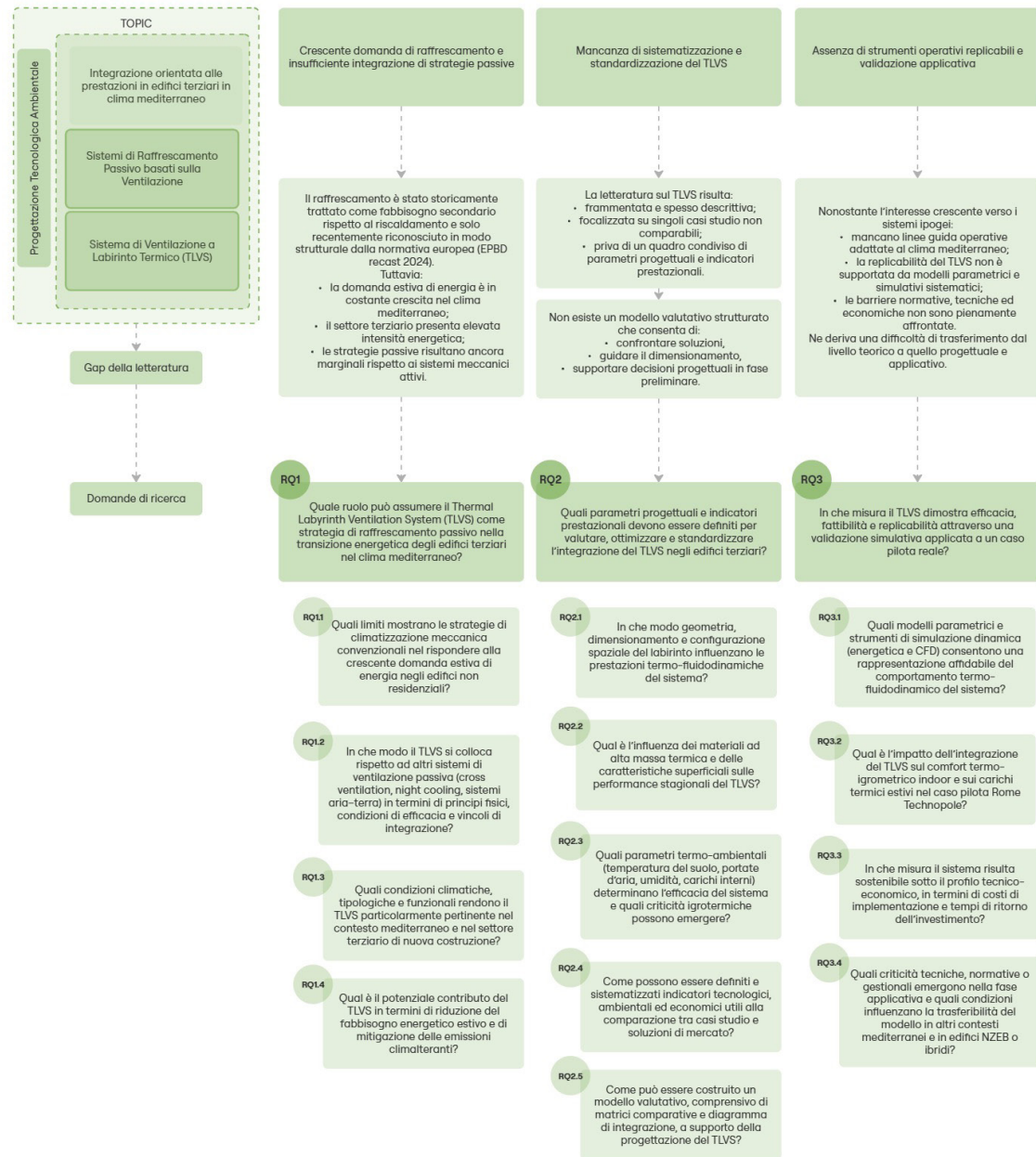
- ratteristiche superficiali sulle performance stagionali del TLVS?
3. Quali parametri termo-ambientali (temperatura del suolo, portate d'aria, umidità, carichi interni) determinano l'efficacia del sistema e quali criticità igrotermiche possono emergere?
  4. Come possono essere definiti e sistematizzati indicatori tecnologici, ambientali ed economici utili alla comparazione tra casi studio e soluzioni di mercato?
  5. Come può essere costruito un modello valutativo, comprensivo di matrici comparative e diagramma di integrazione, a supporto della progettazione del TLVS?

**RQ3. In che misura il TLVS dimostra efficacia, fattibilità e replicabilità attraverso una validazione simulativa applicata a un caso pilota reale?**

1. Quali modelli parametrici e strumenti di simulazione dinamica (energetica e CFD) consentono una rappresentazione affidabile del comportamento termo-fluidodinamico del sistema?
2. Qual è l'impatto dell'integrazione del TLVS sul comfort termigrometrico indoor e sui carichi termici estivi nel caso pilota Rome Technopole?
3. In che misura il sistema risulta sostenibile sotto il profilo tecnico-economico, in termini di costi di implementazione e tempi di ritorno dell'investimento?
4. Quali criticità tecniche, normative o gestionali emergono nella fase applicativa e quali condizioni influenzano la trasferibilità del modello in altri contesti mediterranei e in edifici NZEB o ibridi?

*Schema 0.6 Struttura del framework di ricerca sul TLVS. Schema del percorso logico che collega topic, gap di letteratura e domande di ricerca (RQ), evidenziando criticità, obiettivi e sotto-quesiti per l'analisi e la valutazione del Thermal Labyrinth Ventilation System nel contesto mediterraneo.*

Fonte: K. Mitrík





## 0.4 Obiettivi e Soluzioni della ricerca

Gli obiettivi generali (GO) definiscono l'orizzonte teorico e metodologico della ricerca, delineandone i presupposti culturali e disciplinari e stabilendone i confini concettuali e operativi. Tali obiettivi generali sono ulteriormente articolati in obiettivi specifici (SO), connessi alle diverse fasi in cui si struttura il lavoro di ricerca. Gli obiettivi specifici consentono di rendere operativi e verificabili gli obiettivi generali all'interno dell'impianto metodologico della tesi.

**GO1 Costruire il quadro teorico-critico di riferimento sui sistemi di raffrescamento passivo basati sulla ventilazione e definire il posizionamento del TLVS nel contesto della transizione energetica dell'edilizia terziaria mediterranea.**

- SO 1.1. Studio e analisi della letteratura scientifica e tecnica sui sistemi di raffrescamento passivo ventilativo, con particolare riferimento ai sistemi ipogei e al TLVS.
- SO 1.2. Analisi del quadro normativo e strategico internazionale, europeo e nazionale relativo alla prestazione energetica degli edifici, alla decarbonizzazione e al raffrescamento.
- SO 1.3. Confronto critico tra il TLVS e altre strategie di raffrescamento passivo (ventilazione naturale, night cooling, sistemi terraria), al fine di individuarne potenzialità, limiti e ambiti di applicabilità nel clima mediterraneo.

**GO2. Definire e sistematizzare i parametri progettuali, tecnologici e ambientali che influenzano le prestazioni del TLVS, al fine di costruire un modello valutativo a supporto della progettazione.**

- SO 2.1. Analisi comparativa di casi studio internazionali con integrazione di sistemi assimilabili al TLVS, attraverso criteri qualitativi e quantitativi.
- SO 2.2. Indagine e classificazione delle componenti tecnologiche del TLVS disponibili sul mercato, con valutazione delle loro caratte-

ristiche prestazionali.

- SO 2.3. Definizione di parametri fisico-tecnici, termo-ambientali ed economici e costruzione di matrici comparative per la valutazione integrata del sistema.
- SO 2.4. Elaborazione di un diagramma di valutazione e di linee guida operative per l'integrazione del TLVS negli edifici terziari di nuova costruzione.

GO3.Verificare sperimentalmente l'efficacia, la fattibilità e la replicabilità del TLVS attraverso modellazione parametrica e simulazione applicata a un caso pilota nel clima mediterraneo.

- SO 3.1. Sviluppo di un modello parametrico del TLVS per l'ottimizzazione preliminare delle configurazioni geometriche e materiche.
- SO 3.2. Simulazione energetica dinamica e analisi termo-fluidodinamica (CFD) per la valutazione del comportamento del sistema in termini di comfort indoor e riduzione dei carichi estivi.
- SO 3.3. Applicazione del sistema al caso pilota Rome Technopole e valutazione della sostenibilità tecnica, economica e della replicabilità del modello nel contesto mediterraneo.

## 0.5 Risultati

I risultati della ricerca sono proposti come contributo all'evoluzione della Progettazione Tecnologica Ambientale in relazione al tema della progettazione basata sulle prestazioni e dell'adattamento climatico nel settore edilizio terziario mediterraneo. In particolare, la ricerca intende offrire un avanzamento metodologico e applicativo nel campo dei sistemi di raffrescamento passivo basati sulla ventilazione, attraverso la sistematizzazione e la validazione del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) quale dispositivo integrabile nei processi progettuali orientati alla decarbonizzazione.

Il primo risultato (R1) consiste nella definizione di un quadro teorico e metodologico sul ruolo del raffrescamento passivo ventilativo nella transizione energetica, con specifico riferimento al clima mediterraneo e agli edifici terziari. L'analisi critica della letteratura scientifica e del quadro normativo internazionale, europeo e nazionale ha permesso di chiarire la crescente centralità della domanda di raffrescamento estivo e di posizionare il TLVS all'interno del panorama delle strategie passive esistenti. Tale risultato restituisce una mappatura concettuale delle condizioni climatiche, tipologiche e funzionali che rendono il sistema particolarmente efficace, contribuendo a colmare la frammentazione conoscitiva rilevata negli studi precedenti.

Il secondo risultato (R2) consiste nella costruzione di un modello valutativo integrato per l'integrazione progettuale del TLVS. Attraverso l'analisi, la valutazione e la comparazione di casi studio internazionali, nonché mediante un'indagine sulle componenti tecnologiche disponibili sul mercato, la ricerca ha sistematizzato parametri fisico-tecnici, termo-ambientali ed economici in un quadro coerente e comparabile. Tale processo ha condotto all'elaborazione di matrici valutative e di un diagramma di integrazione del sistema, concepiti come strumenti operativi di supporto alla progettazione. Il modello sviluppato assume valore metodologico autonomo, in quanto consente la normalizzazione e la catego-

rizzazione dei parametri prestazionali, rendendo il TLVS misurabile e replicabile all'interno di differenti contesti progettuali.

Il terzo risultato (*R3*) riguarda la validazione applicativa del sistema attraverso modellazione parametrica e simulazioni termo-energetiche e fluidodinamiche avanzate, applicate al caso pilota Rome Technopole. L'integrazione tra simulazioni dinamiche e analisi CFD ha permesso di verificare quantitativamente l'impatto del TLVS sulla riduzione dei carichi termici estivi e sul miglioramento del comfort termo-igrometrico indoor, dimostrandone la fattibilità tecnica e la potenziale sostenibilità economica. Tale fase conferisce solidità scientifica al modello proposto e ne rafforza la trasferibilità in contesti mediterranei analoghi, aprendo la strada a future applicazioni e sviluppi di ricerca.

Nel loro insieme, R1, R2 e R3 delineano un percorso coerente che va dalla costruzione del quadro teorico alla formalizzazione di strumenti metodologici fino alla verifica applicativa, configurando un contributo integrato alla progettazione di edifici terziari orientati alla neutralità climatica e all'adattamento ambientale.

## 0.6 Destinatari della ricerca

I risultati della presente ricerca si rivolgono a una pluralità di attori operanti nei settori della progettazione architettonica, della pianificazione ambientale e della ricerca scientifica.

In primo luogo, il lavoro intende fornire un supporto metodologico e operativo ai professionisti del settore edilizio e ai progettisti, offrendo strumenti e indicazioni utili all'integrazione dei Thermal Labyrinth Ventilation Systems (TLVS) nelle diverse fasi del processo progettuale, dal concept iniziale alla definizione esecutiva. L'approccio adottato consente di valutare le potenzialità del sistema anche in funzione delle condizioni climatiche, tipologiche e prestazionali dei contesti specifici, contribuendo a una progettazione energeticamente efficiente e climaticamente responsiva.

Parallelamente, la ricerca si pone come riferimento alla ricerca accademica, in particolare per i gruppi di studio e i laboratori di ricerca impegnati nell'ambito delle strategie passive, del comfort ambientale indoor e delle simulazioni dinamiche energetiche. L'analisi critica della letteratura, l'organizzazione sistematica dei casi studio e l'utilizzo di modelli simulativi avanzati mirano a fornire un contributo aggiornato alla conoscenza scientifica nel settore, costituendo una base solida per ulteriori sviluppi interdisciplinari.

Infine, i risultati dello studio offrono un supporto operativo per i tecnici delle amministrazioni pubbliche, nell'ambito di programmi di rigenerazione urbana, efficienza energetica e mitigazione climatica. L'adozione di tecnologie passive come i TLVS può infatti supportare obiettivi di sostenibilità, efficienza energetica e riduzione delle emissioni in ambito urbano, contribuendo alla definizione di strumenti normativi e linee guida per l'edilizia pubblica e privata nei contesti mediterranei.

## 0.7 Organizzazione della ricerca e struttura della tesi

### Collaborazione a corsi di insegnamento universitari

- Collaborazione alla didattica all'interno del Laboratorio di Progettazione Tecnologica dell'Architettura (Codice Corso: 1055808; SSD: ICAR-12; CFU: 8; 100 ore aula), rivolto agli studenti del III anno attraverso seminari formativi caratterizzanti e di supporto alla didattica. Organizzato da: CdLM c.u. Architettura. Titolare di Cattedra: prof. Fabrizio Tucci; Tutor: Arch. PhD P. Altamura, Arch. PhD V. Cecafozzo, Arch. PhD G. Turchetti, Arch. PhD M. Giampaolletti, Arch. F. Amadei, Arch. C. Dalsasso, Arch. L. M. Giannini, Arch. K. Mitrik, Arch. L. Montagner, Arch. F. Nava, Arch. M. M. Pani, Arch. V. Tulelli  
Periodo 1 marzo 2023 - 31 luglio 2023

### Attività scientifica e di ricerca

- Attività di ricerca del gruppo "Rome Technopole", nell'ambito del progetto dal titolo: "New project models of green-smart NZEB for energy transition, resource circularity and decarbonisation in constructions, towards Climate Neutrality and Positive Energy behavior, also aimed at the construction design of the new campus and headquarters of the Rome Technopole. Nuovi modelli progettuali di Net Zero Energy Building, green e smart, per la transizione energetica, la circolarità delle risorse, la decarbonizzazione e la lotta ai cambiamenti climatici, verso una Neutralità Climatica e un comportamento Positive Energy, anche mirati alla progettazione del nuovo campus e sede del Rome Technopole". Tale attività si colloca nell'ambito della Flagship Project 2 (FP2) di Sapienza Università di Roma, intitolata "Energy transition and digital transition in urban regeneration and building construction".  
Periodo: 1 novembre 2022- 31 ottobre 2025
- Ricerca in Convenzione: PROGETTO "SMH - SMART MOBILITY

HUB” Piattaforme integrate di generazione e accumulo di energia in configurazione “ad isola” per servizi off-grid, Referente CNR STEMS: Dott. Ing. Michela Costa, Responsabile Scientifico Sapienza: Prof. Fabrizio Tucci. Gruppo di lavoro: Arch. PhD Giada Romano (Coordinamento operativo), Arch. PhD Paola Altamura, Arch. PhD Valeria Cecafofso, Arch. PhD Marco Giam-paoletti, Arch. PhD Gaia Turchetti, Arch. Marco Antonini, Arch. Chiara Mastellari, Arch. Kristina Mitrik, Arch. Lavinia Montagner, Arch. Stefano Urbinati

### Partecipazione in qualità di relatore a convegni e seminari

- Partecipazione all’organizzazione come co-relatrice e co-organizzatrice del Seminario di presentazione del libro “BASES - Benessere Ambiente Sostenibilità Energia Salute. Programmare e progettare nella transizione” organizzato nell’ambito delle attività dei Cluster della SITdA Società Italiana di Tecnologia dell’Architettura, presso la sede della Facoltà di Architettura Sapienza Università di Roma, in data 15 giugno 2023.

### Programma di Dottorato internazionale

- Periodo di studio dottorale (3 mesi) presso la RWTH Aachen University (Aquisgrana, Germania), sotto la supervisione del responsabile dell’unità di ricerca Daniele Santucci, Vice-capo della cattedra di Tecnologia dell’Edilizia (Deputy Head of the Chair of Building Technology), con responsabilità nella ricerca e nell’insegnamento considerati in un approccio olistico integrato nel curriculum di architettura.

### Seminari scientifici e corsi di formazione specialistica frequentati nell’ambito del Dottorato

- “How to build smart energy systems based on variable renewables?” del Prof.dr.sc. Neven Duic, Università di Zagabria – Dipartimento di Energia, Ingegneria energetica e ambientale, Facoltà di Ingegneria Meccanica e Architettura Navale, in modalità Meet, 30 gennaio 2023.
- “Best practice in Europa per l’adattamento e la mitigazione verso la neutralità climatica delle città”, organizzato dal Green City Network con il Prof. Fabrizio Tucci (Sapienza Università di Roma), presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA, 14 febbraio 2023.

- “Urban resilience. Planning and regeneration of public building” del Dott. Piero Pelizzaro (Globe Italia), 22 maggio 2023.
- “Tools for the urban regeneration. Practices, processes and design” di Ignacio Gravalos La Cambra (Escuela de Arquitectura San Jorge, Saragozza) e Patrizia Di Monte (Studio Gravalos Di Monte), 29 maggio 2023.
- “Out of the comfort zone” del Prof. Daniele Santucci, RWTH Aachen University, in modalità Meet, 3 giugno 2023.
- “I sistemi a idrogeno per l’architettura” del Dott. Benedetto Nastasi, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA (anche online), 7 febbraio 2024.
- “I sistemi a idrogeno per l’architettura” del Dott. Benedetto Nastasi, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA (anche online), 14 febbraio 2024.
- “I sistemi a idrogeno per l’architettura” del Dott. Benedetto Nastasi, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA (anche online), 21 febbraio 2024.
- “Natura e Techne. Dialogo aperto tra Progettazione Tecnologica Ambientale, Capitale Naturale e Aree Protette”, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA, 4 dicembre 2024.
- “Transizione energetica: tecnologie rinnovabili e smart energy systems” del Prof. Davide Astiaso Garcia, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA (anche online), 10 dicembre 2024.
- “Transizione energetica: tecnologie rinnovabili e smart energy systems” del Prof. Davide Astiaso Garcia, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA (anche online), 17 dicembre 2024.
- Partecipazione al Corso Autodesk Revit completo di 100 ore, istruttore: Marco D’Ascenzio, in data 5 aprile 2023\_Archibit Generation S.r.l. AUTODESK AUTHORIZED TRAINING CENTER.
- Partecipazione al Corso Revit Structure di 17-24 ore, istruttore: Marco D’Ascenzio, in data 12 maggio 2023\_Archibit Generation S.r.l. AUTODESK AUTHORIZED TRAINING CENTER.
- Partecipazione al Corso Historical Bim completo di 9-16 ore, istruttore: Marco D’Ascenzio, in data 19 maggio 2023\_Archibit Generation S.r.l. AUTODESK AUTHORIZED TRAINING CENTER.
- Partecipazione al Corso Autodesk Dynamo di 17-24 ore, istruttore: Elisabetta Cenci in data 26 maggio 2023\_Archibit Generation S.r.l. AUTODESK AUTHORIZED TRAINING CENTER.
- Corso di Formazione Transdisciplinare - Le Scienze della Sostenibilità 2023 \_ gestito dal Prorettore alla sostenibilità: Livio de Santoli\_ inizio 15 aprile 2023 - fine 7 luglio 2023.



### Workshop scientifici e attività laboratoriali di carattere progettuale e interdisciplinare

- “Rome Technopole Workshop Flagship Projects”, presso l’Aula Magna del Rettorato della Sapienza Università di Roma, 15 febbraio 2023.
- “Le cinque R dell’immobile pubblico. Rigenerazione, Ricostruzione, Recupero, Riuso, Resilienza”, moderato dalla giornalista Paola Pierotti, presso l’Aula Magna Bruno Zevi, Facoltà di Architettura – Via Gramsci 53, 18 aprile 2023.
- Workshop di scrittura scientifica del Prof. Andrea Lucarelli (Stockholm University), presso l’Aula Seggioline del Dipartimento PDTA, 25 maggio 2023
- “Science Visualization I – La Storia, i Metodi e le Pratiche”, a cura del Prof. Carlo Martino e del Dott. Alessio Caccamo, presso l’Aula Piccinato – Dipartimento PDTA, 25 settembre 2024.
- “Science Visualization II – Gli strumenti di progetto”, presso l’Aula Piccinato – Dipartimento PDTA, 26 settembre 2024.
- “Science Visualization III – Strutturare la Ricerca”, presso l’Aula Master – Dipartimento PDTA, 2 ottobre 2024.
- “Science Visualization IV – Visualizzare la Ricerca”, presso l’Aula Master – Dipartimento PDTA, 3 ottobre 2024.

### Partecipazione a convegni, forum e incontri di approfondimento scientifico

- XII Forum di COIMA – Real Estate Forum “Le città del futuro”, in diretta streaming, 21 novembre 2023.

### Cerimonie accademiche e giornate istituzionali del Dottorato

- “The power of play” della Prof.ssa Cas Holman, organizzata dalla Prof.ssa Sabrina Lucibello, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA, 7 novembre 2023.
- Inaugurazione dell’Anno Accademico 2024–2025 del Dottorato in Pianificazione, Design, Tecnologia dell’Architettura, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA, 25 febbraio 2025.

### Riunioni di coordinamento scientifico e attività dei tavoli tematici del Progetto Rome Technopole

- Riunione del Tavolo “Transizione energetica nel progetto multiscale”, coordinata dal Prof. Fabrizio Tucci, in modalità Meet, 1 dicembre 2023.
- Rome Technopole – Riunione Plenaria FP2, in modalità online (Microsoft Teams), 15 luglio 2024.
- Rome Technopole – Riunione Plenaria FP2, organizzata da COIMA, in modalità online, 23 gennaio 2025.
- Riunione del Curriculum Progettazione Tecnologica Ambientale (PTA), coordinata dalla Prof.ssa Alessandra Battisti, presso la Sala delle Seggioline, Dipartimento PDTA – Via Flaminia 70, 13 novembre 2024.

### Attività di pubblicazione scientifica svolta durante il dottorato

- Giannini L. M, Mitrik K. , Nava F. , Pani M. M. . (2025) Climate neutrality and new habitat models. Carbon neutral urban districts: case studies, energy and climate solutions. NMP2024 “Intercluster Su- perSession SITdA.
- Tucci, F., Cecafozzo, V., Giampaolletti, M., Turchetti, G., Mitrik, K., Montagner, L. (2025) Green architecture, nzeb and climate neutrality. An intervention design model for deep renovation of public housing. MED Green Forum 7th edition, Beyond energy transitions towards carbon neutral Mediterranean cities. Springer Nature, Florence.
- Tucci, F., Mitrik, K. and Montagner, L. (2025) “Trombe wall and thermal labyrinth – Bioclimatic strategies for the Mediterranean climate”, AGATHÓN | International Journal of Architecture, Art and Design, 18, pp. 250–263. doi: 10.69143/2464-9309/18142025.
- Cecafozzo, V., Romano, G., Mitrik, K., Montagner, L. (2026), Categorie di soluzioni tecnico-progettuali standardizzate per passive heating/cooling systems. In: Tucci, F., Baiani, S., D'Ambrosio, V., Losasso, M., Valente, R. (2026), Retrofit e smart communities

per la transizione energetica dell'edilizia residenziale. Collana Progettazione Tecnologica Ambientale, Altralinea Edizioni, Firenze.

- D'Olimpio, D., Cecafofso, V., Mitrik, K., & Montagner, L. (In review). Bioclimatic solutions for the Mediterranean climate: standardisation and dissemination of passive systems between tradition and innovation.
- Farace, G., Mastellari, C., Mitrik, K., Losardo, E., Pala, L., & Uchiello, M. F. (In review). Tracciati d'acqua: rigenerazione urbana nella città della memoria. *Journal of Urban Regeneration and Sustainable Design*.
- Mitrik, K. (In review), Sfide e opportunità per città decarbonizzate, resilienti e sostenibili: il ruolo dei sistemi di raffrescamento passivo basati sulla ventilazione, Primo Quaderno di Ananke, Dipartimento PDTA, Sapienza Università di Roma.



PARTE I

# CONTESTO DI RIFERIMENTO SCIENTIFICO E CULTURALE

#### *ABSTRACT (INGLESE)*

*Chapter 1 defines the theoretical and regulatory framework underpinning the research, highlighting the progressive centrality of cooling in energy policies and in the regulation of the building sector. A particularly significant element is the fact that cooling, historically treated as a secondary requirement compared to heating, has only been explicitly and structurally recognised in the most recent update of the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD – recast 2024). This marks a paradigm shift: summer air conditioning is no longer considered an accessory, but an essential component of the energy performance and environmental quality of buildings. The analysis is contextualised within the multi-level decarbonisation strategies, Agenda 2030, Paris Agreement, European Green Deal and Fit for 55, highlighting the systemic weight of the building sector, which is responsible for approximately 30% of final energy consumption globally and, considering the entire life cycle, approximately 37% of energy-related CO<sub>2</sub> emissions. In Europe, buildings account for approximately 40% of final energy consumption and 36% of climate-changing emissions, making them a priority area for action. In this scenario, the demand for cooling is one of the most critical and structurally growing dynamics of contemporary energy systems: global electricity consumption associated with air conditioning exceeds 2,000 TWh per year and generates emissions of close to 1 Gt of CO<sub>2</sub>, contributing significantly to peak loads and infrastructure criticalities. In the national context, the size of Italy's building stock (approximately 14 million buildings) and the high energy intensity of the non-residential sector reinforce the strategic importance of this issue. Office buildings have an average consumption of approximately 197 kWh/m<sup>2</sup>·year, with a predominant thermal component and a growing share attributable to summer air conditioning. The explicit inclusion of cooling in European performance criteria therefore takes on not only technical but also systemic value, as it guides design towards strategies capable of addressing energy needs at their root. In this perspective, passive cooling is interpreted as a design device consistent with regulatory developments and climate neutrality objectives, as well as a tool for integrating energy efficiency, environmental comfort and sustainability in the built environment.*

# Quadro di riferimento della ricerca:

transizione energetica, crisi climatica e ruolo del raffrescamento passivo nell'ambiente costruito

## ABSTRACT

Il Capitolo 1 definisce il quadro teorico e normativo che sostiene la ricerca, evidenziando la progressiva centralità del raffrescamento nelle politiche energetiche e nella regolazione del settore edilizio. Un elemento di particolare rilevanza è rappresentato dal fatto che il raffrescamento, storicamente trattato come fabbisogno secondario rispetto al riscaldamento, trova un riconoscimento esplicito e strutturale solo nel più recente aggiornamento della Direttiva sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD – recast 2024). Tale passaggio segna un cambiamento paradigmatico: la climatizzazione estiva non è più considerata una condizione accessoria, ma una componente essenziale della prestazione energetica e della qualità ambientale degli edifici. L'analisi è contestualizzata entro le strategie multilivello di decarbonizzazione, Agenda 2030, Accordo di Parigi, Green Deal europeo e Fit for 55, evidenziando il peso sistemico del settore edilizio, responsabile a scala globale di circa il 30% dei consumi finali di energia e, considerando l'intero ciclo di vita, di circa il 37% delle emissioni energetiche di CO<sub>2</sub>.

In ambito europeo, gli edifici incidono per circa il 40% del consumo energetico finale e per il 36% delle emissioni climalteranti, configurandosi come ambito prioritario di intervento. In tale scenario, la domanda di raffrescamento rappresenta una delle dinamiche più critiche e strutturalmente crescenti dei sistemi energetici contemporanei: i consumi elettrici globali associati alla climatizzazione degli ambienti superano i 2.000 TWh annui e generano emissioni prossime a 1 Gt di CO<sub>2</sub>, contribuendo in modo significativo ai picchi di carico e alle criticità infrastrutturali. Nel contesto nazionale, la consistenza del patrimonio edilizio italiano (circa 14 milioni di edifici) e l'elevata intensità energetica del comparto non residenziale rafforzano la rilevanza strategica del tema. Gli edifici per uffici presentano consumi medi pari a circa 197 kWh/m<sup>2</sup>·anno, con una componente termica predominante e una quota crescente attribuibile alla climatizzazione estiva. L'inclusione esplicita del raffrescamento nei criteri prestazionali europei assume pertanto un valore non solo tecnico, ma sistemico, poiché orienta la progettazione verso strategie capaci di intervenire alla radice dei fabbisogni energetici. In questa prospettiva, il raffrescamento passivo è interpretato come dispositivo progettuale coerente con l'evoluzione normativa e con gli obiettivi di neutralità climatica, nonché come strumento di integrazione tra efficienza energetica, comfort ambientale e sostenibilità dell'ambiente costruito.





## 1.1 Il contesto culturale e legislativo in ambito internazionale

Negli ultimi anni si è progressivamente delineato un quadro politico e normativo sempre più attento alle problematiche legate al controllo del clima negli ambienti costruiti, con particolare riferimento alla riduzione dei consumi energetici, alla mitigazione del surriscaldamento estivo e all'adattamento agli effetti del cambiamento climatico. Nei principali documenti strategici e nei rapporti di indirizzo elaborati a scala internazionale, europea e nazionale, emerge una crescente attenzione verso l'adozione di soluzioni progettuali orientate alla riduzione della domanda di raffrescamento meccanico, ottenuta attraverso l'integrazione di strategie passive e l'applicazione di un approccio bioclimatico alla progettazione (Lossasso et al. 2020), poiché si tratta di un comparto in continua espansione, anche i relativi consumi energetici e le emissioni di anidride carbonica sono destinati ad aumentare. Nei paragrafi successivi si proporrà pertanto una rassegna delle principali esperienze e degli sviluppi legislativi, culturali e normativi, a scala internazionale e nazionale, che hanno contribuito a definire il ruolo dei sistemi di raffrescamento passivo all'interno delle politiche contemporanee di sostenibilità e adattamento climatico.

La crisi climatica e gli impegni sottoscritti nell'ambito dell'Accordo di Parigi<sup>1</sup> hanno innescato, negli ultimi anni, un processo globale volto alla decarbonizzazione dei sistemi energetici e al raggiungimento della neutralità carbonica entro la metà del secolo. Secondo il Sesto Rapporto dell'IPCC<sup>2</sup>, per limitare il riscaldamento globale entro +1,5 °C è necessario che le emissioni mondiali di gas serra raggiungano il picco entro il 2025, si riducano del 43% entro il 2030 e si azzerino intorno al 2050 (IPCC 2023a). Secondo la *World Meteorological Organization*<sup>3</sup> (WMO) e le osservazioni climatiche più recenti, le temperature medie globali nel 2024 sono state di circa +1,55 °C rispetto al periodo pre industriale (1850–1900), segnando di fatto una prima superazione temporanea della soglia presabilita su base annuale (*Figura 1.1*), anche se il limite di Parigi è definito come media su più decenni (WMO 2025). Questi obiettivi risultano coerenti, ma allo stesso tempo estremamente sfidanti, rispetto sia

1. Trattato internazionale sul clima adottato nel 2015 durante la COP21 a Parigi, nell'ambito della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC). Il suo obiettivo centrale è mantenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, puntando a limitarlo a 1,5 °C, attraverso una rapida riduzione delle emissioni di gas serra e il rafforzamento delle capacità di adattamento ai cambiamenti climatici. Per maggiori informazioni consultare il sito: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/paris-agreement-climate/>

2. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) è il principale organismo internazionale che valuta i cambiamenti climatici. È stato creato nel 1988 dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM) e dal Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) per fornire una valutazione scientifica basata sui dati del riscaldamento globale e dei suoi effetti. L'IPCC non conduce ricerche proprie, ma analizza e valuta il lavoro di migliaia di scienziati da tutto il mondo, pubblicando regolarmente rapporti di valutazione. Nello stesso anno, l'Assemblea generale delle Nazioni

Unite ha approvato l'azione congiunta dell'OMM e dell'UNEP nell'istituzione dell'IPCC. Conta 195 Stati membri.

3. L'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM) è un'agenzia specializzata delle Nazioni Unite responsabile della promozione della cooperazione internazionale nei settori della meteorologia e delle scienze atmosferiche. L'OMM monitora il meteo, il clima e le risorse idriche e fornisce supporto ai suoi membri nelle previsioni e nella mitigazione dei disastri. L'organizzazione si impegna a far progredire la conoscenza scientifica e a migliorare la sicurezza e il benessere pubblico attraverso il suo lavoro.

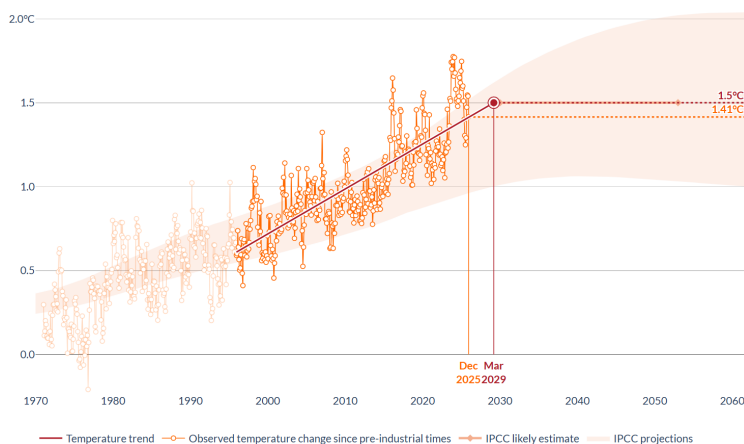
4. Il pacchetto Fit for 55 punta a una riduzione del 55% delle emissioni entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, promuovendo l'adozione di tecnologie edilizie sostenibili e prevede una revisione dei meccanismi che da anni disciplinano la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra e che costituiscono il perno della politica climatica europea, al fine di adeguarli ai nuovi e più ambiziosi obiettivi climatici. Per maggiori informazioni consultare il sito: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/fit-for-55/>

*Figura 1.1 Andamento dell'anomalia della temperatura media globale rispetto ai livelli pre-industriali (1970–2025) e proiezione lineare del trend trentennale fino al possibile raggiungimento della soglia di +1,5 °C. Fonte: Copernicus Climate Change Service (C3S), <https://climate.copernicus.eu/>*

al traguardo di riduzione del 55% delle emissioni fissato dal pacchetto di misure europeo *Fit for 55*<sup>4</sup> (COM 2021b), sia agli impegni assunti attraverso gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030 (SDG's).

Tuttavia, nonostante molti Paesi abbiano formalizzato obiettivi di neutralità climatica, le emissioni continuano a crescere, toccando livelli record nel decennio passato (IPCC 2022). L'intensificazione dei processi che spingono il sistema urbano verso condizioni sempre più critiche, tra cui l'accentuazione dell'isola di calore urbana (*Urban Heat Island, UHI*), l'elevata densità abitativa, il continuo aumento dei consumi energetici e le emissioni generate dalla mobilità, contribuisce ad aggravare ulteriormente il già allarmante scenario del cambiamento climatico (Losasso 2022; Tucci, Herzog, e Ronchi 2018).

Entro il 2050, circa 1,6 miliardi di persone in oltre 970 città saranno regolarmente esposte a temperature estreme, rendendo il caldo un fattore strutturale delle dinamiche urbane future. Il caldo estremo è già oggi la principale causa di mortalità legata agli eventi climatici e contribuisce indirettamente all'aggravarsi dell'inquinamento atmosferico, che provoca circa 7 milioni di morti premature ogni anno (UNEP 2025b). Mentre i modelli dei sistemi energetici erano inizialmente focalizzati maggiormente sulla sicurezza energetica e sui costi, la politica sui cambiamenti climatici è da allora emersa come un fattore potente che guida molti studi, con particolare attenzione alle strategie necessarie per conseguire le significative riduzioni delle emissioni di gas serra indicate dalla comunità scientifica internazionale (Pfenninger, Hawkes, e Keirstead 2014).



1.1.1 Transizione energetica, crisi climatica e centralità del  
raffrescamento nel settore edilizio

Nel quadro delle politiche climatiche, il settore degli edifici e delle costruzioni riveste un ruolo strategico, poiché incide in modo significativo sia sui consumi energetici sia sulle emissioni di gas a effetto serra. A livello globale, esso assorbe circa il 30% dell'energia finale, pari a oltre 135 EJ all'anno, ed è responsabile di circa il 27% delle emissioni operative di CO<sub>2</sub>. Se si considerano anche i materiali da costruzione e i processi industriali connessi, il contributo complessivo del settore sale a circa il 37% delle emissioni energetiche mondiali (IEA 2023b; Novosel et al. 2021; UNEP 2024b). Nell'ambito europeo, gli edifici rappresentano circa il 40% del consumo finale di energia, di cui il 27% attribuibile al comparto non residenziale, e producono circa il 36% delle emissioni di gas a effetto serra (Figura 1.2).

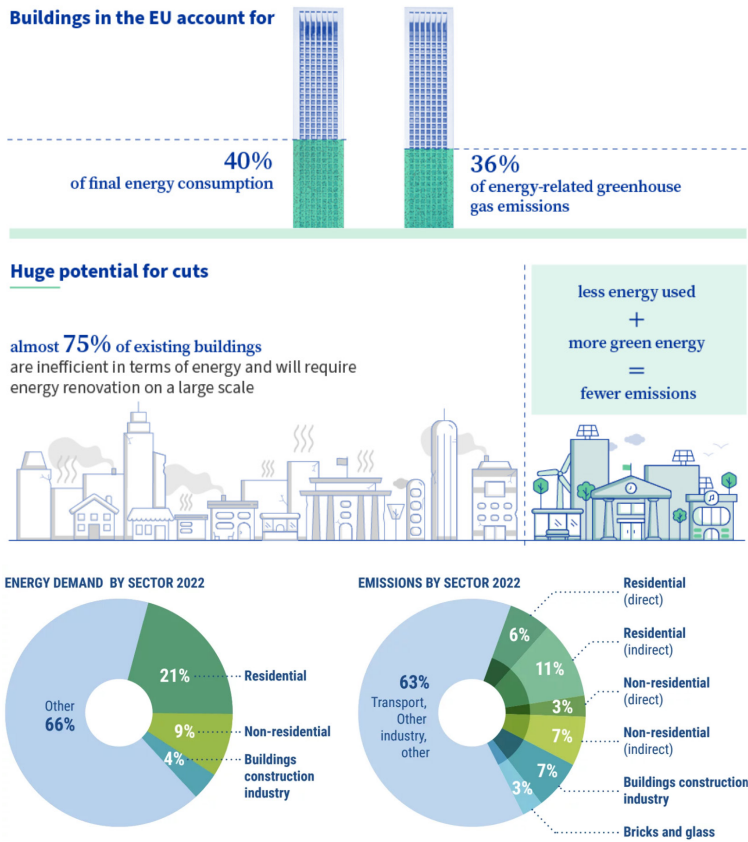


Figura 1.2 Incidenza del settore edilizio sui consumi energetici e sulle emissioni di gas a effetto serra nell'Unione europea e potenziale di riduzione associato agli interventi di efficienza energetica. Fonte: Consiglio dell'Unione europea, Fit for 55 – Making buildings in the EU greener, infografica istituzionale, <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-making-buildings-in-the-eu-greener/>



*Figura 1.3* Edificio urbano con condizionatori d'aria e ombre degli alberi. Copertina della guida del Programma Ambientale delle Nazioni Unite (UNEP) sui Contributi Determinati a Livello Nazionale (NDC) per il raffreddamento. Fonte: © Pexels <https://www.pexels.com/photo/urban-building-with-air-conditioners-and-tree-shadows-31447530/>

La rilevanza del settore è ulteriormente accentuata dal rapido aumento della domanda di raffrescamento, in particolare nelle aree caratterizzate da climi caldi e da una forte urbanizzazione, che costituisce uno dei principali motori della crescita dei consumi energetici negli edifici.

Nel solo 2021, l'energia utilizzata per il funzionamento degli edifici è aumentata di circa il 4% rispetto all'anno precedente, riportando le emissioni su una traiettoria di crescita. Nello stesso anno, le emissioni operative del settore hanno raggiunto circa 10 Gt di CO<sub>2</sub>, pari al 37% delle emissioni energetiche globali, evidenziando il divario ancora esistente tra gli obiettivi climatici e la realtà dei consumi (UNEP 2022a). Per allinearsi agli obiettivi di neutralità climatica al 2050, l'intensità energetica media degli edifici dovrebbe ridursi di circa il 35%, passando da valori prossimi a 150 kWh/m<sup>2</sup>·anno a circa 95 kWh/m<sup>2</sup>·anno. Un traguardo di questa portata risulta difficilmente raggiungibile senza una forte riduzione dei fabbisogni di raffrescamento estivo, che rappresentano una quota crescente dei carichi energetici complessivi (*Figura 1.3*) (UNEP 2022c).

In linea con queste strategie, le politiche europee e nazionali stanno promuovendo un nuovo modello edilizio, incentrato sugli edifici a energia quasi zero (NZEB), la riqualificazione energetica profonda e l'adozione di sistemi passivi. Queste soluzioni, affiancate quando necessario da impianti attivi ad alta efficienza, permettono di ridurre sensibilmente il fabbisogno termico degli edifici e l'uso di condizionatori, contribuendo a contenere le emissioni climalteranti.

Il quadro culturale che ne emerge riflette un cambio di paradigma: l'efficienza negli usi finali, in particolare in edilizia, e l'adozione diffusa di tecnologie pulite non sono più opzionali, ma rappresentano i pilastri imprescindibili di una transizione energetica non più rimandabile. Un ruolo importante per la neutralità climatica infatti sarà poi giocato dalle tecnologie di rimozione dei gas climalteranti, molte ancora in fase di sviluppo e oggetto di discussione. Tecnologie che però serviranno per rendere "neutrali" emissioni difficili da azzerare, come quelle del settore dell'aviazione, dell'agricoltura e di alcuni processi industriali (ASviS e Manzo 2022). Come confermato dagli ultimi rapporti dell'IPCC, solo interventi immediati e profondi in tutti i settori possono garantire un futuro climaticamente sicuro (IPCC 2023b).

Il rapporto *Net Zero Emissions by 2050* dell'International Energy Agency (IEA 2023b) delinea un percorso verso l'azzeramento delle emissioni nette di CO<sub>2</sub> entro la metà del secolo, garantendo al contempo l'accesso universale all'energia e la sua disponibilità a costi sostenibili. Per il settore del raffrescamento, lo scenario stabilisce

tre traguardi prioritari al 2030:

- almeno il 20% della superficie totale degli edifici esistenti e la totalità delle nuove costruzioni dovranno raggiungere lo standard “zero emissioni di carbonio”;
- le temperature impostate nei condizionatori dovranno essere moderate tra 24 e 25 °C;
- l'efficienza media delle nuove apparecchiature dovrà aumentare di almeno il 50% in tutti i mercati.

Il raggiungimento di tali obiettivi richiede un rafforzamento degli *Minimum Energy Performance Standards*, (standard minimi di prestazione energetica, MEPS), l'adozione e l'applicazione rigorosa di codici energetici per l'edilizia, e una più intensa cooperazione internazionale. Secondo le stime dell'IEA (2023), queste misure permetterebbero di contenere l'aumento della domanda globale di elettricità per il raffrescamento degli ambienti a circa il 10% tra il 2021 e il 2030, rispetto a una crescita stimata del 40% in assenza di interventi.

Nel contesto nazionale italiano, il patrimonio edilizio assume una dimensione quantitativa e strategica di primaria importanza. Il parco immobiliare risulta composto da circa 14 milioni di edifici, dei quali circa 1,7 milioni destinati a usi non residenziali, corrispondenti a una quota prossima al 12% del totale. Tale consistenza evidenzia il peso strutturale del settore terziario e produttivo nel sistema edilizio italiano, non solo sotto il profilo numerico, ma soprattutto in relazione al potenziale impatto energetico e ambientale che tali tipologie edilizie esercitano sul bilancio nazionale dei consumi e delle emissioni, le destinazioni d'uso prevalenti includono edifici produttivi (19%), commerciali (16%) e di servizio (12%) (ENEA 2024).

L'analisi dei consumi specifici medi per destinazione d'uso conferma l'elevata intensità energetica di alcune tipologie edilizie. Gli uffici presentano un consumo medio pari a circa 197 kWh/m<sup>2</sup>·anno, ripartito tra 130 kWh/m<sup>2</sup>·anno per usi termici e 67 kWh/m<sup>2</sup>·anno per usi elettrici (MASE 2024). Questa distribuzione evidenzia come la domanda di energia termica costituisca la componente prevalente del bilancio energetico del settore. Gli edifici adibiti a uffici e servizi pubblici si distinguono per un profilo energetico particolarmente energivoro, costituendo quindi un ambito prioritario per le politiche di efficienza e decarbonizzazione (MASE 2021, 2024).

A livello macro settoriale, il comparto civile (residenziale + terziario) è centrale nelle strategie di riduzione dei consumi energetici. La Relazione sulla Situazione Energetica Nazionale 2021 indica per il settore civile un obiettivo di riduzione al 2030 pari a 5,7 Mtep, di

cui 2,4 Mtep attribuiti al solo terziario (MASE 2021). Ciò evidenzia il ruolo determinante del non residenziale nel conseguimento degli obiettivi di efficienza energetica. Alla luce di questo quadro, il settore termico, che comprende riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria, assume un ruolo strategico nella decarbonizzazione del patrimonio edilizio nazionale, incluso il comparto non residenziale. Nel 2023 la quota di fonti rinnovabili nel settore riscaldamento e raffrescamento si attesta a circa 22%, con un obiettivo prossimo al 36% al 2030 previsto dal PNIEC aggiornato. La produzione termica da fonti rinnovabili raggiunge circa 12.500 ktep, con un target al 2030 di oltre 17.600 ktep, mentre il contributo delle pompe di calore da energia ambiente è pari a circa 3.100 ktep, destinato a crescere fino a quasi 5.700 ktep. Il documento riconosce inoltre, ai fini del monitoraggio europeo, anche la quota di energia sottratta agli ambienti per il raffrescamento, segnalando l'ingresso formale della climatizzazione estiva nel bilancio energetico nazionale. In tale contesto, la riduzione strutturale dei fabbisogni termici degli edifici, inclusi quelli estivi, si configura come condizione complementare e necessaria per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione, in particolare nei comparti non residenziali caratterizzati da elevata intensità energetica (Camera dei deputati, Servizio Studi 2025).

Le proiezioni del PNIEC 2019 indicano inoltre che nel periodo 2015–2030 il settore civile registra una riduzione dell'11% delle emissioni, principalmente per effetto dell'incremento dell'efficienza energetica, tuttavia, l'espansione del parco edilizio nel terziario e l'aumento della domanda energetica hanno storicamente contribuito all'incremento emissivo, rendendo strutturale la necessità di interventi di riqualificazione profonda (ISPRA 2025; MIMIT 2019). Gli sforzi compiuti in questi anni attraverso l'applicazione delle Direttive UE sull'efficienza energetica hanno migliorato significativamente le prestazioni energetiche delle nuove costruzioni (soprattutto per quanto riguarda il comportamento nella stagione di riscaldamento) e in parte del patrimonio edilizio esistente, ma la strada per raggiungere pienamente l'obiettivo nZEB appare ancora lunga (Ascione et al. 2016). Certamente, esiste una forte correlazione tra le condizioni climatiche e le prestazioni dell'edificio. Pertanto, per sviluppare un parco immobiliare sostenibile e resiliente, è essenziale progettare edifici che tengano conto dei cambiamenti climatici durante tutto il loro ciclo di vita (Baglivo, Congedo, e Malatesta 2023). Complessivamente, emerge un quadro in cui il settore edilizio, e in particolare il comparto non residenziale, rappresenta un pilastro strategico per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione. La combina-



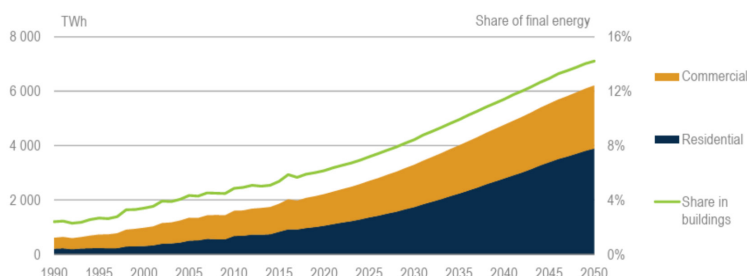
zione di regolamenti stringenti, innovazione tecnologica e strategie di riqualificazione profonda è indispensabile per ridurre i consumi e le emissioni, promuovendo al contempo un ambiente costruito più sostenibile e resiliente.

### 1.1.2 Il raffrescamento nel contesto della crisi climatica: politiche, consumi energetici e ruolo del settore edilizio

Il 2022 ha visto una drastica riduzione della produzione idroelettrica in Paesi come Italia e Francia, superiore al 20–30%, in concomitanza con estati eccezionalmente calde che hanno intensificato la domanda di raffrescamento, costringendo a un maggiore ricorso a fonti fossili per coprire i picchi di carico (IEA 2023a). Questa combinazione di stress climatico e vulnerabilità energetica ha contribuito anche a una forte volatilità dei prezzi dell'elettricità, con livelli più che tripli rispetto al periodo pre-crisi, incidendo direttamente sulla sostenibilità economica del raffrescamento meccanico e sulla sicurezza energetica dei sistemi urbani.

Il legame tra crisi climatica e domanda di raffrescamento è sempre più stretto e rappresenta una delle componenti in più rapida crescita dei consumi energetici globali (Salata et al. 2022). Come evidenziato nella *Figura 1.4*, il consumo energetico globale per il raffrescamento degli ambienti mostra una crescita costante e strutturale, con un contributo particolarmente rilevante del settore residenziale e del comparto terziario. Il raffrescamento rappresenta pertanto una delle principali componenti emergenti della domanda energetica degli edifici, configurandosi come fattore critico per la sostenibilità dei sistemi energetici futuri (IEA 2018).

La capacità installata dei sistemi di raffrescamento è destinata a triplicare, passando da 22 terawatt nel 2022 a 68 terawatt entro il 2050 (IEA 2018; Talluri 2022; UNEP 2025b), con un conseguente incremento senza precedenti della domanda di elettricità. In assenza di interventi strutturali, le emissioni associate al settore del raf-

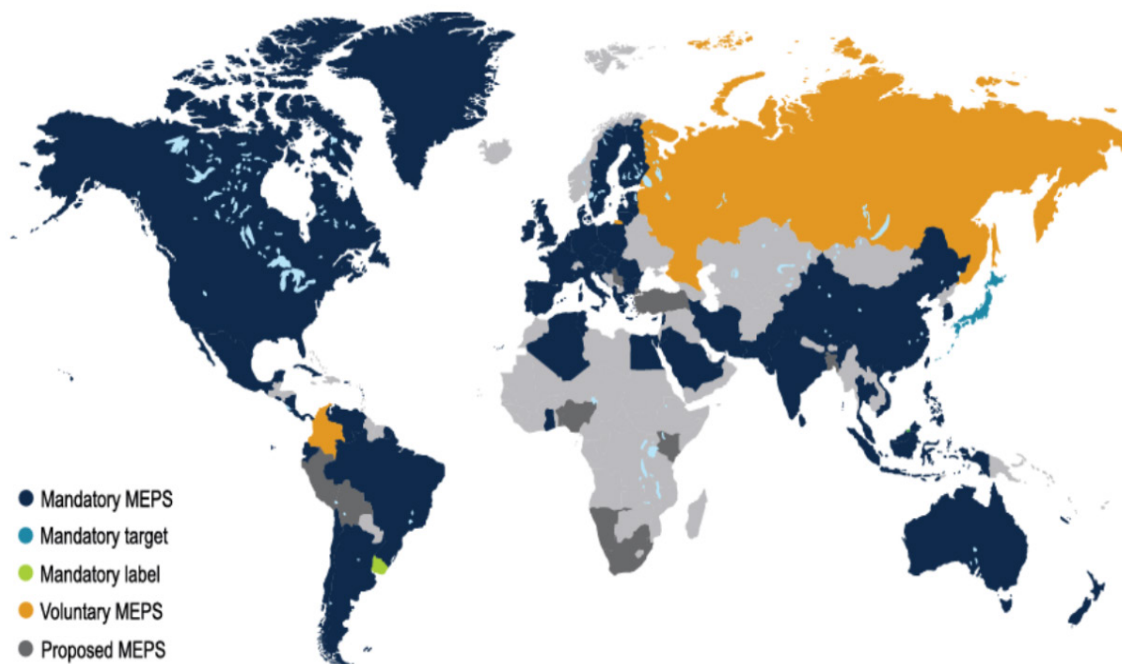


*Figura 1.4* Consumo energetico globale per il raffrescamento degli ambienti per sottosettore nello scenario di riferimento (Baseline Scenario). Fonte: International Energy Agency (IEA), *The Future of Cooling*, 2018.

frescamento potrebbero quasi raddoppiare, raggiungendo circa 7 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente annue entro la metà del secolo. L'aumento delle ondate di calore e delle temperature estreme spinge una diffusione senza precedenti dei climatizzatori: si stima che a livello globale gli apparecchi di raffreddamento passeranno da circa 1,6 miliardi nel 2018 a oltre 5 miliardi entro il 2050, con un ritmo di vendita ipotizzato di 10 nuovi condizionatori al secondo nei prossimi decenni (IEA 2018; Khosla et al. 2020).

Il raffrescamento ha anche un impatto rilevante sull'aumento dei picchi di domanda elettrica, contribuendo al sovraccarico della rete e aumentando il rischio di blackout e costi elevati per i consumatori. Inoltre, una crescita incontrollata della domanda potrebbe rallentare la transizione verso sistemi energetici più puliti, aumentandone i costi e le complessità (Tucci 2020; UNEP 2023b). La distribuzione geografica globale dei regimi regolatori relativi ai *Minimum Energy Performance Standards* (MEPS), ai target obbligatori e ai sistemi di etichettatura energetica evidenzia come l'adozione di tali strumenti non sia uniforme tra le diverse aree del mondo (Figura 1.5). Tale disomogeneità riflette differenti livelli di maturità normativa, priorità politiche e sviluppo dei mercati del raffrescamento, confermando il ruolo centrale della governance energetica nel contenimento degli impatti del cooling (IEA 2018).

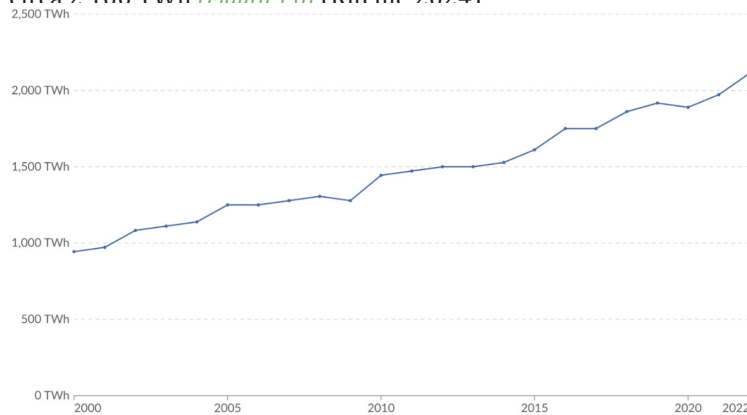
*Figura 1.5* Diffusione globale dei *Minimum Energy Performance Standards* (MEPS), dei target obbligatori e dei programmi di etichettatura energetica per i climatizzatori. Fonte: International Energy Agency (IEA), *The Future of Cooling*, 2018.





Questo fenomeno rischia di innescare un circolo vizioso, in cui il riscaldamento globale alimenta una crescente domanda di climatizzazione che, se soddisfatta attraverso apparecchi inefficienti e fonti fossili, contribuisce ad aggravare ulteriormente il cambiamento climatico (IEA 2018; IPCC 2022). La domanda di raffrescamento degli ambienti ha registrato un aumento del 45% dal 2010, una crescita guidata non solo dall'innalzamento delle temperature, ma anche da fattori socio-economici e culturali, quali l'aumento della superficie edificata e le mutate aspettative di comfort termico. Attualmente, il 37% della popolazione mondiale possiede un condizionatore, quota destinata a superare il 45% entro il 2030 (UNEP 2024a).

Nonostante ciò, oltre 3,5 miliardi di persone vivono in aree caratterizzate da temperature elevate, ma solo circa il 15% ha accesso a un sistema di climatizzazione (Randazzo et al. 2024; UNICEF 2021). Secondo i dati della International Energy Agency (IEA), i sistemi di climatizzazione e ventilazione rappresentano oggi circa il 20% del consumo elettrico globale degli edifici, assorbendo nel solo 2022 circa 2.100 TWh (Figura 1.6) (Ritchie 2024).



*Figura 1.6 Consumo globale di elettricità per l'aria condizionata-Consumo di elettricità per il "raffreddamento degli ambienti", che include i ventilatori ma è per lo più aria condizionata. Misurato in terawattora (TWh). Fonte -*

Naturalmente, una quota significativa di tale elettricità è ancora prodotta da combustibili fossili, rendendo il raffrescamento un contributore rilevante alle emissioni climalteranti. Nel 2022, il raffreddamento degli ambienti ha generato circa 1 miliardo di tonnellate di CO<sub>2</sub> derivanti dal solo consumo di elettricità (Ritchie 2024). Questo meccanismo di retroazione positiva è definito in letteratura come "vicious cooling cycle" (UNEP 2024a). Il riscaldamento globale aumenta la necessità di raffrescamento, che a sua volta incrementa la produzione di energia, spesso da fonti fossili, aggravando ulteriormente il cambiamento climatico (CCC 2024). Tuttavia, questa con-

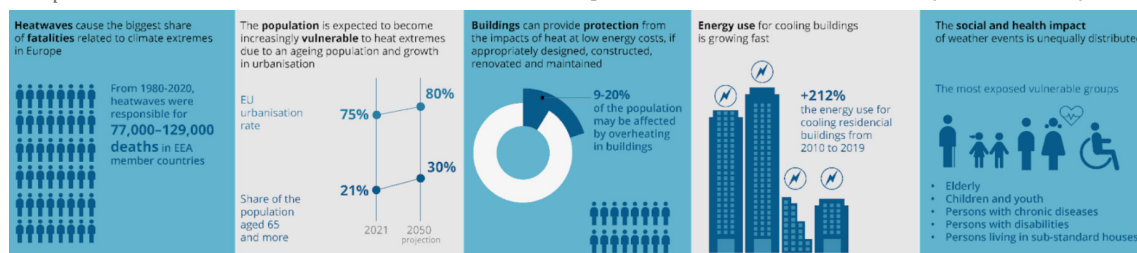
5. L'indice dei gradi giorno di raffrescamento (CDD, Cooling Degree Days) è un parametro climatico utilizzato per stimare la domanda energetica necessaria al raffrescamento degli edifici. Esso si determina a partire dalla temperatura dell'aria esterna, considerando la somma delle eccedenze giornaliere rispetto a una prefissata temperatura di base, generalmente riferita al periodo compreso tra aprile e settembre. Il CDD esprime quindi, su base meteorologica, l'intensità del fabbisogno di climatizzazione estiva, convenzionalmente valutato per temperature superiori ai 24 °C.

dizione è destinata a cambiare rapidamente nei prossimi anni, in particolare nei Paesi in via di sviluppo, dove l'aumento del reddito e l'urbanizzazione spingeranno una crescita massiccia della domanda di raffrescamento (IEA 2025). Le proiezioni indicano che, in assenza di politiche mirate, le emissioni legate al raffrescamento potrebbero raggiungere valori compresi tra 4,4 e 6,1 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente entro il 2050, superando il 10% delle emissioni globali previste (UNEP 2023b). Parallelamente, circa 1,2 miliardi di persone, prevalentemente nelle regioni più povere e calde del pianeta, rimangono prive di servizi di raffrescamento di base, rendendo il caldo estremo un potente moltiplicatore delle disuguaglianze climatiche (UNEP 2024b).

La fornitura di energia elettrica e termica è al centro di questa discussione; tuttavia, l'impatto del riscaldamento globale e dei cambiamenti climatici, insieme all'aumento del potere d'acquisto e al miglioramento degli standard di vita in tutta Europa, rendono l'approvvigionamento energetico per il raffrescamento un fattore sempre più rilevante. Secondo l'Agenzia Europea per l'Ambiente, i gradi giorno di raffrescamento<sup>5</sup> (CDD) ponderati per la popolazione sono in costante aumento, a causa non solo del riscaldamento climatico, ma anche del miglioramento degli standard abitativi e dell'aumento del potere d'acquisto, che aumenta la vulnerabilità degli edifici alla sovratemperatura estiva.

In particolare, gli edifici terziari si distinguono per elevati carichi interni e continuità di utilizzo, rendendo necessario il ricorso a strategie alternative per contenere il fabbisogno energetico estivo. (EEA 2021). Il trend lineare dal 1981 al 2017 mostra un aumento da 73,7 a 107,2 gradi giorno di raffreddamento (Novosel et al. 2021). Alla luce di questi dati, il raffrescamento non può più essere considerato un semplice servizio tecnologico, ma deve essere riconosciuto come un'infrastruttura essenziale, al pari dell'accesso all'acqua o all'energia. L'UNEP definisce il **"raffrescamento sostenibile"** (Figura 1.7) come una strategia capace di proteggere salute, produttività e sistemi urbani dal caldo estremo, riducendo al contempo le emissioni climalteranti e la pressione sulle reti elettriche (UNEP 2025b).

*Figura 1.7 Impatti delle ondate di calore, vulnerabilità della popolazione e crescita dei consumi energetici per il raffrescamento degli edifici in Europa. Fonte: European Environment Agency (EEA), Cooling buildings sustainably in Europe. <https://www.eea.europa.eu/publications/cooling-buildings-sustainably-in-europe/cooling-buildings-sustainably-in-europe>*



## 1.2 Quadro globale di riferimento: Agenda 2030 e Obiettivi di Sviluppo Sostenibile

### 1.2.1 L'Accordo di Parigi (2015): quadro multilaterale di riferimento per la mitigazione climatica e la decarbonizzazione dei sistemi energetici e dell'ambiente costruito

L'Accordo di Parigi, adottato alla COP21 di dicembre 2015, rappresenta l'ultima e più rilevante pietra miliare nei negoziati multilaterali sui cambiamenti climatici e costituisce tuttora il principale quadro di riferimento per la cooperazione internazionale in materia di clima (United Nations 2015). In tale contesto, l'Unione europea si è progressivamente affermata come attore centrale, adottando strumenti di politica climatica interna quali il *Green Deal europeo* e promuovendo contributi determinati a livello nazionale (NDC) improntati a un progressivo rafforzamento dell'ambizione climatica (CE 2025).

Negli ultimi anni, il quadro normativo internazionale in materia di energia e clima ha conosciuto un'evoluzione significativa, rafforzando gli obiettivi di decarbonizzazione anche in settori ad alta intensità energetica, tra cui quello edilizio. Tuttavia, valutazioni recenti indicano come gli impegni attualmente assunti dagli Stati non risultino ancora sufficienti per conseguire il target di 1,5 °C, rendendo necessarie ulteriori e più incisive misure di mitigazione (UNEP 2022b). In questo contesto si inserisce anche l'Emendamento di Kigali al Protocollo di Montreal, adottato nel 2016 e ratificato da oltre 170 Paesi, che prevede una riduzione graduale degli idrofluorocarburi (HFC) utilizzati nei sistemi di refrigerazione e condizionamento, pari a circa l'85 % entro il 2047 rispetto ai livelli del 2010 (UNEP 2019).

Un passaggio fondamentale per l'attuazione dell'Accordo di Parigi è stato segnato dalla ventiseiesima Conferenza delle Parti (COP26), svoltasi a Glasgow nel 2021 nell'ambito della UNFCCC. In tale occasione, le Parti hanno completato la definizione delle regole operative in materia di trasparenza e rendicontazione, rendendo pienamente operativo l'*Enhanced Transparency Framework* (ETF), che introduce obblighi comuni di comunicazione, meccanismi di revisione tec-

6. Per maggiori informazioni consultare il sito: <https://sdgs.un.org/goals>

nica e processi di valutazione multilaterale di carattere facilitativo (UNFCCC 2021a). Su questa traiettoria di rafforzamento dell'azione climatica si colloca anche l'aggiornamento degli impegni europei in vista della COP30 di Belém nel novembre 2025. In tale occasione, il Consiglio dell'Unione europea ha approvato il nuovo NDC dell'Unione e dei suoi Stati membri, che estende l'orizzonte temporale fino al 2035, confermando l'obiettivo di riduzione del 55 % delle emissioni nette di gas a effetto serra entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990. Il nuovo contributo introduce inoltre un obiettivo indicativo di riduzione compreso tra circa il 66 % e il 72% entro il 2035, in coerenza con il percorso verso la neutralità climatica entro il 2050. La presentazione di tale aggiornamento alle Nazioni Unite riflette la volontà dell'UE di rafforzare ulteriormente la propria ambizione climatica e di contribuire al rilancio dell'azione globale, in linea con gli esiti del primo *Global Stocktake* e con l'obiettivo di stimolare impegni più ambiziosi da parte delle altre Parti (CE 2024).

Sebbene i documenti ufficiali ONU dell'Agenda 2030 non menzionino esplicitamente il raffrescamento passivo, negli ultimi anni agenzie e coalizioni internazionali hanno proposto iniziative collaterali per evidenziarne l'importanza (Khosla et al. 2020). Ad esempio, la *Sustainable Energy for All* (SEforALL) in partnership con l'UNEP ha lanciato la campagna "*Cooling for All*", sottolineando che l'accesso al raffrescamento è un prerequisito per molti SDG e stimando che oltre 1,1 miliardi di persone non hanno accesso a un raffrescamento adeguato, con rischi per la salute e la produttività (SEforALL 2025). In tale prospettiva, il raffrescamento passivo è promosso come soluzione chiave soprattutto per le comunità a basso reddito e le regioni in via di sviluppo, in quanto consente di mitigare gli effetti del caldo senza richiedere infrastrutture costose né incrementare il consumo energetico. Un recente rapporto del *World Economic Forum* e UNEP ha persino suggerito di considerare il "raffrescamento sostenibile" come un possibile ulteriore indicatore di sviluppo, talvolta definito come un "18° SDG" simbolico, in virtù della sua rilevanza intersettoriale (CCCAC 2018).

### 1.2.2 Gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile come cornice operativa per l'energia, la città e l'azione climatica

Gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (*Sustainable Development Goals*<sup>6</sup> – SDGs) costituiscono il nucleo dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, un programma d'azione globale adottato all'unanimità dai 193 Stati membri delle Nazioni Unite nel 2015. Tale Agenda è concepita come una *roadmap* condivisa per la promozione della

pace, della prosperità umana e della tutela del pianeta entro il 2030, superando la distinzione tra Paesi sviluppati e in via di sviluppo e coinvolgendo l'intera comunità internazionale in un partenariato globale. Al centro di questo impegno vi sono 17 Obiettivi (Figura 1.8) interconnessi che affrontano le principali sfide economiche, sociali e ambientali del nostro tempo, connessi a 169 traguardi specifici che traducono in azioni concrete la visione strategica globale. Questi SDGs spaziano dalla lotta alla povertà e alla fame, alla garanzia di salute, istruzione di qualità e parità di genere, fino alla promozione di un'energia sostenibile, alla città resilienti e alla mitigazione dei cambiamenti climatici, nonché alla tutela degli ecosistemi marini e terrestri, alla riduzione delle disuguaglianze e al rafforzamento di partnership internazionali per lo sviluppo.

A metà del percorso verso il 2030, oltre la metà dei target mostra progressi deboli o insufficienti e circa un terzo evidenzia stagnazione o regressione, soprattutto nei settori chiave energia, clima e città (United Nations 2023). In tale contesto, la presente ricerca assume come riferimento privilegiato tre obiettivi (SDG 7, SDG 11 e SDG 13) non in chiave meramente descrittiva, ma come cornice operativa entro cui valutare il contributo delle strategie di raffrescamento passivo, alla decarbonizzazione del patrimonio edilizio e all'aumento della resilienza climatica. Il contributo sistematico di Khosla et

*Figura 1.8 I 17 Obiettivi di sviluppo sostenibile, Sustainable Development Goals. Fonte: <https://sdgs.un.org/goals>*



*Tabella 1.1 Esempi indicativi di interconnessioni tra ciascun Obiettivo di Sviluppo Sostenibile (SDG) e la fornitura di raffrescamento, evidenziando il ruolo del cooling nel sostenere benessere umano, sistemi energetici, resilienza urbana e azione climatica. Fonte: rielaborazione da Khosla et al., Cooling for Sustainable Development (Khosla et al. 2020)*

al. propone una lettura integrata del raffrescamento come sistema socio-tecnico, composto da soluzioni attive e passive, e dimostra, attraverso una revisione estensiva della letteratura, l'esistenza di collegamenti concreti e bidirezionali tra la fornitura di raffrescamento e ciascun SDG. La Tabella seguente sintetizza tali relazioni, offrendo un quadro concettuale utile a inquadrare il raffrescamento sostenibile come leva strategica per l'attuazione dell'Agenda 2030 (*Tabella 1.1*) (Khosla et al. 2020).

| SDG's                                            | Quadro concettuale per l'inquadratura del raffrescamento sostenibile                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SDG 1 - Nessuna povertà                          | L'aumento del calore estremo senza misure di raffrescamento è collegato alla diminuzione della produttività dei terreni e del reddito, aggravando la povertà soprattutto nei paesi in via di sviluppo. Anche la riduzione del raffrescamento dovuta alla diminuzione degli spazi verdi urbani è collegata all'aumento della povertà economica.                                            |
| SDG 2 - Fame zero                                | Il raffrescamento consente la produzione e la distribuzione degli alimenti attraverso la catena del freddo, nonché attraverso tecniche di raffrescamento che supportano la produzione alimentare nelle serre e nei sistemi acquaponici.                                                                                                                                                   |
| SDG 3 - Buona salute e benessere                 | Il raffrescamento riduce l'impatto sulla salute dell'esposizione grave al calore, soprattutto con gli effetti dei cambiamenti climatici sull'aumento delle temperature. Inoltre, il calore ha un impatto sul benessere dei neonati.                                                                                                                                                       |
| SDG 4 - Istruzione di qualità                    | Le facoltà cognitive sono compromesse dalle temperature estreme e il calore ha un effetto negativo sulla produttività e sui risultati di apprendimento, che possono essere mitigati dal raffrescamento.                                                                                                                                                                                   |
| SDG 5 - Uguaglianza di genere                    | Le attività domestiche legate all'alimentazione sono spesso responsabilità delle donne, e le opportunità offerte dalla refrigerazione consentono alle donne di intraprendere piccole attività imprenditoriali e ridurre il tempo dedicato alla preparazione quotidiana dei pasti.                                                                                                         |
| SDG 6 - Acqua pulita e servizi igienico-sanitari | I processi industriali (ad esempio le centrali termoelettriche) richiedono grandi quantità di acqua per il raffrescamento, con importanti implicazioni e scelte in termini di disponibilità e qualità dell'acqua.                                                                                                                                                                         |
| SDG 7 - Energia pulita e accessibile             | Il raffrescamento attivo degli spazi e la refrigerazione hanno un fabbisogno energetico molto elevato e influenzano la progettazione dei sistemi di energia pulita (anche attraverso le tecnologie di raffrescamento solare). Il raffrescamento è necessario anche per generare energia pulita, ad esempio attraverso l'energia solare concentrata.                                       |
| SDG 8 - Lavoro dignitoso e crescita economica    | Il raffrescamento riduce gli impatti negativi sulla salute, sull'economia e sulla produttività dei lavoratori, soprattutto alla luce degli effetti negativi dei cambiamenti climatici.                                                                                                                                                                                                    |
| SDG 9 - Industria, innovazione e infrastrutture  | Il raffrescamento su larga scala è fondamentale per mantenere la resilienza e la sostenibilità delle infrastrutture, come le centrali elettriche e i data center, e per creare infrastrutture adattive in risposta al crescente impatto delle isole di calore urbane e dell'aumento della popolazione.                                                                                    |
| SDG 10 - Riduzione delle disuguaglianze          | Il raffrescamento sostenibile ha il potenziale di ridurre le disuguaglianze tra i paesi e all'interno degli stessi ed è proposto come destinatario dei finanziamenti per il clima attraverso fondi multilaterali per gli investimenti nell'energia pulita e nel clima, in particolare dall'OCSE ai paesi in via di sviluppo.                                                              |
| SDG 11 - Città e comunità sostenibili            | La fornitura di sistemi di raffrescamento attivo e passivo è fondamentale per l'abitabilità e la sostenibilità delle comunità e delle città in settori quali il trasporto pubblico e privato, le abitazioni e la progettazione e pianificazione urbana.                                                                                                                                   |
| SDG 12 - Consumo e produzione responsabili       | Il consumo energetico per il raffrescamento grava pesantemente sulle risorse energetiche e la produzione di tecnologie di raffrescamento ha un impatto significativo sulla sostenibilità lungo tutto il suo ciclo di vita (dall'estrazione allo smaltimento). Il raffrescamento delle catene del freddo e la refrigerazione sono inoltre fondamentali per ridurre gli sprechi alimentari. |
| SDG 13 - Azione per il clima                     | Il consumo energetico per il raffrescamento determina un forte aumento delle emissioni di gas serra che causano il cambiamento climatico. Inoltre, i gas fluorurati sono un sottoprodotto fondamentale della refrigerazione e della climatizzazione, che hanno uno dei più alti potenziali di riscaldamento globale.                                                                      |

|                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SDG 14 - Vita sott'acqua                      | Le catene del freddo e le pratiche di refrigerazione sono fondamentali per l'industria ittica. Inoltre, i processi di raffreddamento industriale influiscono sulla biodiversità sottomarina (ad esempio, l'immissione di acqua costiera per il raffreddamento nelle centrali nucleari influisce sulla popolazione di meduse). |
| SDG 15 - Vita sulla terraferma                | La refrigerazione a temperature molto basse consente la crioconservazione delle specie terrestri in via di estinzione. Inoltre, un uso sostenibile del suolo urbano mitiga il fenomeno delle isole di calore urbane attraverso il raffreddamento evaporativo.                                                                 |
| SDG 16 - Pace, giustizia e istituzioni solide | Il raffreddamento è al centro di accordi internazionali come il Protocollo di Montreal e, con la crescente visibilità del suo potenziale per l'Agenda 2030 e l'Accordo di Parigi, che mirano alla pace e alla giustizia in tutte le istituzioni.                                                                              |
| SDG 17 - Partnership per gli obiettivi        | Il raffreddamento e i refrigeranti fanno parte del portafoglio dei finanziamenti globali per il clima destinati ai paesi in via di sviluppo e contribuiscono a migliorare i finanziamenti, le tecnologie e le capacità dei paesi per lo sviluppo sostenibile.                                                                 |

Alla luce di tali interconnessioni, l'analisi si concentra sugli SDG 7, 11 e 13, nei quali il raffreddamento sostenibile incide in modo più diretto sulla domanda energetica, sulla resilienza dell'ambiente costruito e sulle strategie di mitigazione e adattamento climatico, configurandosi come leva trasversale dell'Agenda 2030.

#### 1.2.2.1 SDG's 7 - Energia pulita e accessibile

Lo *Sustainable Development Goal 7* (SDG 7) dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile mira a "assicurare l'accesso universale a servizi energetici economici, affidabili, sostenibili e moderni per tutti" entro il 2030 (United Nations 2025a). L'obiettivo include non solo l'accesso all'elettricità e ai combustibili puliti, ma anche l'incremento della quota di energie rinnovabili nel mix energetico globale e il raddoppio del tasso di miglioramento dell'efficienza energetica. Tali target sono articolati in una serie di sotto-obiettivi specifici, che spaziano dall'espansione delle infrastrutture energetiche moderne alla promozione di tecnologie efficienti e di cooperazione internazionale per la transizione energetica (Figura 1.9).

In questa prospettiva, il raffreddamento passivo viene considerato una strategia preventiva, capace di incidere direttamente sulla formazione del fabbisogno energetico, riducendo il ricorso ai sistemi meccanici e le emissioni indirette legate alla produzione di elettricità. Tale approccio risulta particolarmente rilevante in un contesto segnato dall'aumento della domanda globale di raffreddamento e dal contributo sempre più significativo del settore edilizio alle emissioni climalteranti (United Nations 2023). Le strategie passivo-microclimatiche assumono, pertanto, il ruolo di strumenti per la riduzione strutturale dei consumi estivi: pur non intervenendo sulla produzione di energia, esse si collocano pienamente nell'orizzonte dello SDG 7, nella misura in cui contengono il fabbisogno di climatizzazione e limitano la dipendenza da sistemi attivi ed energivori. La conseguente diminuzione dei carichi elettrici per il raffreddamento



Figura 1.9 Obiettivo 7: Energia pulita e accessibile (Affordable and Clean Energy). L'icona rappresenta l'impegno verso sistemi energetici sostenibili, affidabili e a basse emissioni, promuovendo l'incremento dell'efficienza energetica e la diffusione delle fonti rinnovabili. Fonte: United Nations, Sustainable Development Goals (<https://sdgs.un.org/goals>)



*Tabella 1.2 Stato di avanzamento dei Target dell'Obiettivo 7 (Energia pulita e accessibile). La tabella sintetizza i progressi globali verso i Target 7.1, 7.2 e 7.3, evidenziando i dati più recenti su accesso all'elettricità, quota di energie rinnovabili nel mix energetico e miglioramento dell'intensità energetica. Fonte: United Nations (2025b), Sustainable Development Goals Progress Report.*

comporta, inoltre, un minore ricorso a fonti fossili o non rinnovabili, contribuendo agli obiettivi di efficienza energetica e uso sostenibile delle risorse. In questa prospettiva, il SDG 7 rappresenta un punto di osservazione privilegiato per comprendere le dinamiche della transizione energetica sostenibile. L'analisi dei suoi principali target consente infatti di evidenziare progressi e criticità in termini di accesso all'energia, diffusione delle fonti rinnovabili ed efficienza energetica (Tabella 1.2).

| SDG's | Target's                                                                                             | Progress (United Nations 2025b)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.1   | Entro il 2030, garantire l'accesso universale a servizi energetici accessibili, affidabili e moderni | Nel 2023, il tasso globale di accesso all'elettricità ha raggiunto il 92 per cento, riducendo il numero di persone prive di elettricità a circa 666 milioni, ovvero 18,8 milioni in meno rispetto al 2022. La grande maggioranza di queste persone – circa l'85 per cento – vive nell'Africa subsahariana, soprattutto in aree rurali. Nonostante circa 73 milioni di nuove connessioni ogni anno, la crescita demografica continua a superare i progressi compiuti: si stima che, senza un'accelerazione significativa, 645 milioni di persone rimarranno ancora senza accesso all'elettricità nel 2030. Per raggiungere l'obiettivo dell'accesso universale, sarebbe necessario aumentare il tasso annuo di espansione fino all'1,2 per cento. Le soluzioni solari off-grid potrebbero coprire fino al 41 per cento dei bisogni delle popolazioni ancora non servite. Tra il 2010 e il 2023, 45 Paesi hanno raggiunto l'accesso universale, ma solo due si trovano nell'Africa subsahariana. Per quanto riguarda l'accesso a sistemi di cottura puliti, nel 2023 la quota di popolazione servita ha raggiunto il 74 per cento (rispetto al 64 per cento nel 2015). Tuttavia, 2,1 miliardi di persone continuano a utilizzare combustibili inquinanti. Se l'attuale ritmo dovesse mantenersi, nel 2030 circa 1,8 miliardi di persone — pari al 22 per cento della popolazione mondiale — rimarrebbero prive di soluzioni di cottura pulite. |
| 7.2   | Entro il 2030, aumentare sostanzialmente la quota di energia rinnovabile nel mix energetico globale  | Nel 2022, le fonti rinnovabili hanno rappresentato il 17,9 per cento dei consumi energetici finali globali. Escludendo la biomassa tradizionale, la quota di "rinnovabili moderne" è cresciuta dal 10 per cento nel 2015 al 13 per cento nel 2022. Il settore elettrico mostra i progressi più significativi: nel 2022 le rinnovabili hanno coperto il 30 per cento dei consumi finali di elettricità. Nel settore dei trasporti, i biocarburanti costituiscono quasi il 90 per cento dell'energia rinnovabile utilizzata; tuttavia, sia nel riscaldamento sia nei trasporti i progressi complessivi rimangono ancora limitati.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 7.3   | Entro il 2030, raddoppiare il tasso globale di miglioramento dell'efficienza energetica              | Nel 2022 l'intensità energetica globale primaria è migliorata del 2,1 per cento, un valore quadruplo rispetto allo 0,5 per cento registrato nel 2021 e leggermente superiore alla media dal 2015. Tale risultato, tuttavia, è stato in parte influenzato dalla crisi energetica globale. Nonostante i progressi, il tasso rimane inferiore all'obiettivo originario del 2,6 per cento annuo. Per allinearsi alla traiettoria richiesta, sarebbe necessario raggiungere un miglioramento medio del 4 per cento all'anno nel periodo 2022–2030.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

1.2.2.2 SDG's 11 - Città e comunità sostenibili

Lo *Sustainable Development Goal 11* mira a “rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili”. L'obiettivo riconosce che la crescente urbanizzazione comporta pressioni significative sulle risorse, sulla qualità dell'aria, sulla salute pubblica e sulla sicurezza degli abitanti (Figura 1.10). Per questo motivo, SDG 11 promuove politiche integrate per la pianificazione urbana,



l'accesso equo agli spazi verdi, la riduzione dell'inquinamento, l'efficienza nell'uso del suolo e il miglioramento della capacità delle città di prevenire e assorbire gli impatti dei cambiamenti climatici (United Nations 2015, 2023). La sostenibilità urbana viene così interpretata non solo come questione ambientale, ma come condizione strutturale per garantire qualità della vita, giustizia sociale e resilienza dei sistemi insediativi. In tale quadro, l'ambiente costruito assume un ruolo centrale: edifici, infrastrutture e spazio pubblico contribuiscono in modo determinante ai consumi energetici, alle emissioni climalteranti e alla formazione delle isole di calore urbana. L'adozione di strategie progettuali orientate alla riduzione dei carichi termici, alla ventilazione naturale e al miglioramento del microclima rappresenta quindi una componente essenziale delle politiche urbane sostenibili (United Nations 2023). La presente ricerca si colloca all'interno di questo orizzonte interpretativo, assumendo il raffrescamento passivo come componente strategica dei processi di adattamento urbano. Considerare i sistemi di raffrescamento passivo significa leggere l'edificio non come entità isolata, ma come parte attiva di un sistema urbano complesso, capace di interagire con il microclima locale e di contribuire alla qualità complessiva degli spazi abitati. Tali strategie passivo-microclimatiche favoriscono la riduzione dei carichi energetici estivi, il contenimento dei fenomeni di sovratemperatura e il miglioramento del comfort termico sia negli ambienti interni sia negli spazi esterni, contribuendo al tempo stesso alla mitigazione degli effetti dell'isola di calore urbana. In questa prospettiva, i sistemi di raffrescamento passivo non rappresentano semplicemente alternative agli impianti meccanici, ma veri e propri dispositivi di adattamento urbano, in grado di rafforzare la resilienza degli insediamenti ai fenomeni climatici estremi e di sostenere le politiche per città più sostenibili e inclusive, in piena coerenza con le finalità dello SDG 11 (United Nations 2025b). Essi consentono di integrare efficienza energetica, qualità ambientale e tutela della salute pubblica, contribuendo alla costruzione di ambienti urbani più vivibili ed equi. L'impiego di strategie bioclimatiche quali, massa termica e dissipatori naturali, rappresentano dispositivi di adattamento capaci di mitigare gli effetti delle ondate di calore e di migliorare il comfort abitativo. Il sistema TLVS si configura, in questo senso, come tecnologia intermedia che integra la tradizione dei sistemi passivi con soluzioni contemporanee ad elevata efficienza, collocandosi in continuità con l'evoluzione tecnologica del raffrescamento naturale analizzata nel capitolo successivo (Tabella 1.3).



*Figura 1.10 Obiettivo 11: Città e comunità sostenibili (Sustainable Cities and Communities). Il simbolo richiama la necessità di sviluppare insediamenti urbani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili, enfatizzando il ruolo della pianificazione urbana, dell'efficienza delle risorse e della qualità ambientale. Fonte: United Nations, Sustainable Development Goals (<https://sdgs.un.org/goals>)*

*Nella pagina successiva:*

*Tabella 1.3 Stato di avanzamento dei Target dell'Obiettivo 11 (Città e comunità sostenibili). La tabella riporta una sintesi dei progressi globali verso i Target 11.1, 11.4, 11.5 e 11.6, con indicatori relativi all'accesso ad alloggi adeguati, alla tutela del patrimonio culturale, alla riduzione degli impatti dei disastri e alla mitigazione dell'impatto ambientale urbano. Fonte: United Nations (2025b), Sustainable Development Goals Progress Report.*

1.3

| SDG's | Target's                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Progress (United Nations 2025b)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11.1  | Entro il 2030, garantire a tutti l'accesso a un alloggio adeguato, sicuro e conveniente e a servizi di base e riqualificare le baraccopoli                                                                                                                                                                                                                  | L'accessibilità economica della casa costituisce una criticità crescente a scala globale. Tra 1,6 e 3 miliardi di persone vivono in condizioni abitative insufficienti, che comprendono situazioni di assenza di alloggio, sovraffollamento o carenza di servizi di base. Nei 124 Paesi per i quali sono disponibili dati comparabili, la spesa per l'abitazione assorbe in media il 31% del reddito delle famiglie, con divari molto marcati: si passa dal 43,5% nell'Africa subsahariana al 21,4% nelle regioni europee e nordamericane. |
| 11.4  | Entro il 2030, migliorare l'urbanizzazione inclusiva e sostenibile e la capacità di pianificazione e gestione partecipativa, integrata e sostenibile degli insediamenti umani in tutti i paesi                                                                                                                                                              | Nel periodo 2019–2023, i fondi pubblici destinati alla protezione del patrimonio mondiale hanno registrato un lieve incremento, ma rimangono largamente insufficienti: in media 21,22 dollari pro capite (PPA 2017), con valori nettamente inferiori nei Paesi in via di sviluppo rispetto a quelli sviluppati.                                                                                                                                                                                                                            |
| 11.5  | Entro il 2030, ridurre significativamente il numero di morti e il numero di persone colpite e diminuire sostanzialmente le perdite economiche dirette relative al prodotto interno lordo globale causate da disastri, compresi i disastri legati all'acqua, con particolare attenzione alla protezione dei poveri e delle persone in situazioni vulnerabili | Parallelamente, gli eventi naturali estremi continuano a generare impatti rilevanti su infrastrutture e servizi collettivi. Tra il 2015 e il 2023 si sono registrate, in media ogni anno, circa 92.000 infrastrutture distrutte o danneggiate e l'interruzione di oltre 1,6 milioni di servizi essenziali, in particolare nei settori sanitario ed educativo.                                                                                                                                                                              |
| 11.6  | Entro il 2030, ridurre l'impatto ambientale negativo pro capite delle città, anche prestando particolare attenzione alla qualità dell'aria e alla gestione dei rifiuti urbani e di altro tipo                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

1.2.2.3 SDG's 13 - Lotta contro il cambiamento climatico

Lo *Sustainable Development Goal 13* richiama la necessità di azioni urgenti per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici, in coerenza con gli impegni assunti nell'Accordo di Parigi (*Figura 1.11*) (UNFCCC 2015, 2021b). L'obiettivo sottolinea che la crisi climatica non rappresenta solo una questione ambientale, ma una sfida sistemica che coinvolge salute, economia, infrastrutture e sicurezza sociale. In questa prospettiva, SDG 13 promuove politiche integrate di mitigazione e adattamento, incoraggiando la riduzione delle emissioni di gas serra, la pianificazione resiliente e l'adozione di soluzioni tecnologiche e progettuali in grado di limitare l'esposizione e la vulnerabilità delle comunità agli impatti climatici (United Nations 2023). All'interno di tale quadro, la presente ricerca interpreta il settore edilizio come uno degli ambiti strategici attraverso cui intervenire sia sulla mitigazione sia sull'adattamento. L'aumento delle temperature medie, la crescente frequenza delle ondate di calore e la conseguente espansione della domanda di raffrescamento rischiano infatti di generare un circolo vizioso: più caldo significa maggior uso di climatizzazione meccanica e, di conseguenza, maggiori emissioni indirette laddove l'energia provenga ancora in larga parte da fonti non rinnovabili. L'adozione di strategie di raffrescamento passivo consente di interrompere questo meccanismo, agen-



*Figura 1.11* Obiettivo 13: Lotta contro il cambiamento climatico (Climate Action). L'icona evidenzia l'urgenza di adottare misure per contrastare il cambiamento climatico e i suoi impatti, sottolineando l'importanza delle strategie di mitigazione, adattamento e resilienza nei sistemi antropici. Fonte: United Nations, Sustainable Development Goals (<https://sdgs.un.org/goals>)

do sulla riduzione del fabbisogno energetico estivo e riducendo così il contributo del settore edilizio alle emissioni climalteranti. In questa prospettiva, il TLVS è analizzato come soluzione replicabile nei climi mediterranei, in grado di contribuire al raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica e di adattamento delineati dalle agende internazionali (Tabella 1.4).

| SDG's | Target's                                                                                                                                                                                     | Progress (United Nations 2025b)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13.1  | Rafforzare la resilienza e la capacità di adattamento ai rischi legati al clima e ai disastri naturali in tutti i paesi                                                                      | I decessi e le persone disperse legati ai disastri sono diminuiti da 1,61 a 0,79 ogni 100.000 abitanti tra i periodi 2005–2014 e 2014–2023, pur continuando a causare in media oltre 41.000 vittime l'anno. Al contrario, le persone colpite da tali eventi sono aumentate, passando da 1.158 a 2.028 per 100.000 abitanti, pari a circa 124 milioni di persone l'anno. Entro il 2024, 131 Paesi avevano adottato strategie nazionali di riduzione del rischio, rispetto ai 57 del 2015. |
| 13.2  | Integrare le misure relative ai cambiamenti climatici nelle politiche, nelle strategie e nella pianificazione nazionale                                                                      | Il 2024 ha segnato probabilmente il primo superamento stabile della soglia di +1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali, diventando l'anno più caldo mai registrato. Le concentrazioni di CO <sub>2</sub> nel 2023 hanno raggiunto valori record, superiori del 151% rispetto all'era preindustriale.                                                                                                                                                                                   |
| 13.3  | Migliorare l'istruzione, la sensibilizzazione e la capacità umana e istituzionale in materia di mitigazione, adattamento, riduzione dell'impatto e allerta precoce dei cambiamenti climatici | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Nel complesso, gli obiettivi qui considerati, SDG 7, SDG 11 e SDG 13, configurano un quadro integrato in cui energia, sistema urbano e azione climatica sono affrontati come dimensioni strutturalmente interconnesse. I processi di transizione delineati dall'Agenda 2030 implicano un ripensamento congiunto delle modalità di produzione e uso dell'energia, delle forme dell'abitare e delle strategie di mitigazione e adattamento, generando ricadute positive in termini ambientali, sociali ed economici (ASviS e Manzo 2022). In tale quadro, anche le strategie di raffrescamento passivo analizzate nella presente ricerca si inseriscono come strumenti concreti per integrare energia sostenibile, città resilienti e azione climatica, contribuendo in modo sinergico al raggiungimento degli obiettivi dell'Agenda 2030.

Tabella 1.4 Stato di avanzamento dei Target dell'Obiettivo 13 (Lotta contro il cambiamento climatico). La tabella sintetizza i progressi globali verso i Target 13.1, 13.2 e 13.3, evidenziando gli indicatori relativi alla resilienza ai disastri, all'integrazione delle politiche climatiche e al rafforzamento delle capacità di adattamento e mitigazione. Fonte: United Nations (2025b), Sustainable Development Goals Progress Report.

## 1.3 Iniziative globali per il clima, l'energia e il raffrescamento sostenibile: accordi, impegni e piattaforme di cooperazione

7. Il Protocollo di Montreal, adottato nel 1987 per eliminare sostanze che riducono lo strato di ozono, è stato ampliato con l'emendamento adottato il 15 ottobre 2016 durante la 28ª riunione delle Parti a Kigali, Ruanda, che ha introdotto specifiche misure di phase-down di HFC a livello globale.

8. Gas refrigeranti sintetici ad alto GWP utilizzati nei sistemi di raffrescamento, responsabili di un rilevante contributo al riscaldamento globale.

9. Global Warming Potential (GWP): indicatore che misura il contributo di un gas serra rispetto alla CO<sub>2</sub> su un orizzonte temporale definito (generalmente 100 o 20 anni). Valori di GWP elevati indicano un forte effetto climalterante anche a basse concentrazioni.

10. Lanciata come iniziativa di punta del Summit sull'azione per il clima del Segretario generale delle Nazioni Unite nel 2019, la Cool Coalition è una piattaforma globale che riunisce oltre 250 governi, aziende, città e istituzioni finanziarie per promuovere un'azione globale sul raffreddamento sostenibile e sul caldo estremo. La Coalizione promuove l'attuazione dell'Accordo di Parigi, dell'Agenda 2030 e

A partire da questo quadro valoriale globale, gli obiettivi dell'Agenda 2030 trovano una prima declinazione operativa attraverso accordi e iniziative internazionali che affrontano in modo più mirato le principali sfide climatiche ed energetiche.

L'Emendamento di Kigali al Protocollo di Montréal<sup>7</sup> rappresenta il principale strumento normativo globale per il settore del raffrescamento, intervenendo sulla progressiva eliminazione degli idrofluorocarburi<sup>8</sup> (HFC) (CE 2017; UNEP 2023c). La sua approvazione da parte dell'Unione europea con la Decisione (UE) 2017/1541 ha rafforzato il collegamento con gli obiettivi dell'Accordo di Parigi, orientando il settore non solo verso refrigeranti a basso GWP<sup>9</sup>, ma anche verso una riduzione strutturale dell'impatto climatico del raffrescamento. In questo senso, Kigali contribuisce indirettamente a valorizzare strategie di riduzione dei carichi termici e raffrescamento passivo, che limitano a monte la domanda di climatizzazione meccanica e rendono più efficace la transizione tecnologica (CE 2017). La rilevanza per la transizione verso un raffrescamento sostenibile è duplice. In primo luogo, gli HFC rappresentano una parte significativa delle emissioni indirette del settore del raffrescamento, contribuendo al riscaldamento globale molto più intensamente del solo anidride carbonica a parità di massa. La loro progressiva eliminazione con l'Emendamento di Kigali è stimata contribuire a risparmiare fino a circa 80 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente entro il 2050, evitando potenziali aumenti della temperatura globale di circa 0,5 °C se pienamente attuato (ASviS 2019; Maccarelli 2023).

### 1.3.1 *Clean Cooling Coalition* (2017): piattaforma di advocacy e cooperazione industriale per la transizione verso sistemi di raffrescamento a basso impatto climatico

Un ruolo pionieristico è stato svolto dalla *Clean Cooling Coalition*<sup>10</sup>, attiva dal 2017, che ha contribuito in modo decisivo a portare il tema del raffrescamento sostenibile all'attenzione delle agende climatiche globali, promuovendo soluzioni a basso impatto ambientale,

tecniche di raffrescamento passivo e l'integrazione del *cooling* nelle politiche di sviluppo (CCC 2021; IEA 2021). Organismi internazionali come l'IEA sottolineano la necessità di standard più rigorosi e politiche dedicate al *cooling* sostenibile, ad esempio introducendo etichette energetiche avanzate e incentivi per i sistemi ad alta efficienza. L'emergenza climatica ha posto il tema del raffrescamento sostenibile in cima alle agende internazionali, riconoscendolo come elemento chiave sia di mitigazione (riduzione delle emissioni) sia di adattamento (protezione della popolazione dalle ondate di calore) (Khosla et al. 2020).

Per quanto riguarda le strategie promosse per la riduzione delle emissioni nel *cooling* della *Clean Cooling Coalition* vi sono:

- Orientamento normativo del settore del raffrescamento
  - Contributo al rafforzamento delle politiche europee sul *cooling* (Regolamento F-gas), creando un quadro regolatorio favorevole alla riduzione strutturale dell'impatto climatico della climatizzazione.
  - Superamento dei refrigeranti ad alto GWP
- Promozione di soluzioni *F-gas free* basate su refrigeranti naturali, come prerequisito per una transizione compatibile con gli obiettivi climatici, in particolare nel settore edilizio.

- Centralità della riduzione dei carichi e dell'efficienza
- Inquadramento delle tecnologie di raffrescamento come parte di una strategia più ampia che include la riduzione della domanda, l'efficienza energetica e l'integrazione con soluzioni passive.

- Capacità attuativa come condizione abilitante
- Valorizzazione della formazione tecnica e delle competenze professionali come elementi essenziali per rendere operative le politiche sul raffrescamento sostenibile.

- Approccio sistemico al "*clean cooling*"

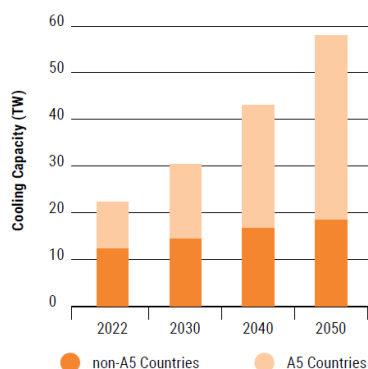
Integrazione tra politiche, tecnologie e competenze per anticipare la transizione del settore verso soluzioni a basso impatto climatico, coerenti con SDG 7, 11 e 13.

### 1.3.2 *Global Cooling Watch* (2021): piattaforma analitica e di monitoraggio per la valutazione della domanda di raffrescamento, delle emissioni e degli scenari futuri

Il *Global Cooling Watch*<sup>11</sup> rappresenta il principale strumento di analisi sistemica sviluppato dal Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) per monitorare l'evoluzione della domanda globale di raffrescamento, i relativi impatti energetici e climatici e le opportunità offerte da percorsi di transizione sostenibile. Il rapporto del 2023 ha fornito per la prima volta una valutazione

dell'Emendamento di Kigali al Protocollo di Montreal, lavorando su tre pilastri: advocacy, scienza e azione congiunta. Per maggiori informazioni consultare il sito: [https://coolcoalition.org/mission?utm\\_source](https://coolcoalition.org/mission?utm_source)

11. Strumento di monitoraggio globale che fornisce analisi sistematiche su domanda energetica, emissioni e accesso ai servizi di raffrescamento, supportando l'elaborazione di politiche basate su evidenze. Per maggiori informazioni consultare il sito: <https://www.unep.org/resources/global-cooling-watch-2025>



**Figura 1.12** Crescita della capacità globale di raffrescamento nello scenario business-as-usual (BAU), con proiezione dell'aumento della capacità installata da circa 22 TW nel 2022 a oltre 68 TW entro il 2050, in assenza di interventi strutturali di riduzione dei carichi e di raffrescamento sostenibile. La figura evidenzia il ruolo critico del settore del cooling nella crescita futura della domanda energetica e delle emissioni climateranti. (Fonte: UNEP, *Global Cooling Watch 2025*, Figura 4-1, p. 20.)

quantitativa integrata delle emissioni dirette e indirette associate all'intero settore del raffrescamento, comprendente climatizzazione degli ambienti, refrigerazione e catene del freddo, evidenziando che, in assenza di interventi strutturali, la capacità globale installata potrebbe quasi triplicare entro il 2050, con un raddoppio dei consumi elettrici e un incremento delle emissioni fino a circa 6,1 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente annue, pari a oltre il 10% delle emissioni globali previste. Il rapporto del 2023 sottolinea come tale traiettoria sia trainata non solo dall'aumento delle temperature medie e dalla maggiore frequenza delle ondate di calore, ma anche dalla crescita demografica, dall'urbanizzazione e dal miglioramento delle condizioni socio-economiche nei Paesi a medio e basso reddito. In questo scenario, il raffrescamento emerge come una sfida duplice: da un lato essenziale per l'adattamento climatico e la protezione della salute, dall'altro potenziale fattore di accelerazione delle emissioni climateranti. Il *Global Cooling Watch 2023* dimostra tuttavia che un mix coordinato di raffrescamento passivo, standard di efficienza energetica più stringenti e rapida riduzione degli HFC potrebbe ridurre le emissioni del settore di oltre il 60% entro il 2050, evitando cumulativamente circa 61 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente, un valore comparabile alle emissioni di centinaia di centrali a carbone di grande scala (UNEP 2023b).

Il *Global Cooling Watch 2025* amplia e raffina questa analisi, spostando l'attenzione sul legame tra caldo estremo, accesso al raffrescamento e resilienza climatica, e introducendo un approccio esplicitamente "passive-first". Il rapporto mostra che, nello scenario business-as-usual, la capacità globale di raffrescamento potrebbe crescere da 22 terawatt nel 2022 a 68 terawatt entro il 2050, con emissioni potenziali fino a 7,2 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente (Figura 1.12).

Al contrario, l'adozione sistematica di strategie di riduzione dei carichi, quali progettazione bioclimatica, ventilazione naturale, schermature solari, superfici riflettenti e soluzioni nature-based, consentirebbe di ridurre la capacità necessaria a circa 40 terawatt, con una contrazione di oltre il 40% rispetto allo scenario di riferimento. Dal punto di vista energetico ed economico, il rapporto 2025 evidenzia che l'implementazione di un *Sustainable Cooling Pathway* potrebbe generare risparmi annui fino a 8.500 TWh di elettricità entro il 2050, riducendo i picchi di domanda di 5-10 terawatt e evitando investimenti cumulativi in infrastrutture elettriche compresi tra 13 e 26 trilioni di dollari. Sul piano microclimatico, i dati mostrano che interventi passivi combinati possono ridurre le temperature indoor di 2-9 °C, con risparmi energetici medi intorno al 30%, arrivando in



molti contesti a eliminare la necessità di climatizzazione meccanica continuativa (UNEP 2025a).

Nel complesso, il *Global Cooling Watch* configura il raffrescamento sostenibile non come una semplice questione tecnologica, ma come infrastruttura critica per l'adattamento climatico, capace di coniugare riduzione delle emissioni, resilienza urbana ed equità sociale. In questa prospettiva, il raffrescamento passivo assume un ruolo strutturale: non misura accessoria, ma primo livello di intervento per ridurre i carichi termici, contenere la domanda energetica e rendere compatibile l'espansione del raffrescamento con gli obiettivi climatici globali (UNEP 2023b, 2025a).

### 1.3.3 *Global Cooling Pledge* (2023): impegno politico multilaterale per la riduzione strutturale delle emissioni da raffrescamento attraverso efficienza, load reduction e soluzioni passive

Questo percorso ha trovato una formalizzazione politica con il *Global Cooling Pledge*<sup>12</sup>, attraverso il quale i Paesi firmatari si impegnano a ridurre in modo sostanziale le emissioni del settore del raffrescamento entro il 2050, riconoscendo esplicitamente il ruolo delle soluzioni passive, dell'efficienza energetica e dei refrigeranti a basso potenziale di riscaldamento globale (UNEP 2023a). Il *Global Cooling Pledge* e i rapporti dell'UNEP ribadiscono la necessità di un'azione coordinata su tre aree chiave:

- 1) Strategie passive per affrontare il calore estremo e ridurre la domanda di raffreddamento negli edifici e nella catena del freddo.
- 2) Standard e norme di efficienza energetica più elevati per le apparecchiature di raffreddamento.
- 3) Una riduzione graduale dei refrigeranti idrofluorocarburi (HFC) che causano il riscaldamento climatico a un ritmo più rapido di quello richiesto dall'emendamento di Kigali al Protocollo di Montreal, migliorando al contempo l'efficienza energetica delle apparecchiature di raffreddamento.

Nel quadro della transizione climatica globale, si definisce un insieme di obiettivi quantitativi e temporali volti a ridurre in modo sostanziale l'impatto climatico del raffrescamento, combinando ambizioni di mitigazione, miglioramento dell'efficienza energetica e ampliamento dell'accesso equo ai servizi di *cooling*:

- Riduzione del 68% delle emissioni da raffrescamento entro il 2050, in linea con lo scenario 1,5 °C.
- Estensione dell'accesso al raffrescamento sostenibile entro il

12. Missione "Global Cooling" (nota anche come Global Cooling Pledge o Global Cooling Initiative), Lanciata nel 2023 sotto la presidenza della COP28 negli Emirati Arabi Uniti in collaborazione con l'UNEP Cool Coalition, la Missione Global Cooling mira a ridurre le emissioni legate al raffrescamento del 68% entro il 2050 rispetto ai livelli attuali.

2030, in una prospettiva di giustizia climatica.

- Miglioramento del 50% dell'efficienza energetica media dei nuovi condizionatori entro il 2030.

Per conseguire tali obiettivi, la *Pledge* promuove un approccio integrato che attribuisce priorità alla riduzione strutturale della domanda di raffrescamento, valorizzando il ruolo delle strategie passive e di progettazione climatica come strumenti fondamentali per contenere i carichi termici, migliorare il comfort e rafforzare la resilienza urbana.

- Riduzione dei carichi termici come priorità: integrazione del raffrescamento passivo nei codici edilizi; progettazione bioclimatica, ventilazione naturale, isolamento; tetti e superfici riflettenti, verde urbano e soluzioni *nature-based*.
- Le strategie passive possono ridurre il fabbisogno di climatizzazione di oltre il 25% negli edifici.
- Mitigazione delle isole di calore urbane tramite incremento di spazi verdi e blu.

*Tabella 1.5* Confronto tra i principali accordi, iniziative e strumenti di cooperazione internazionale sul raffrescamento sostenibile, evidenziandone natura, obiettivi e rilevanza per la riduzione dei carichi termici e l'integrazione del raffrescamento passivo nelle politiche climatiche globali.  
Fonte: K.Mitrik

Alla luce del quadro normativo e delle iniziative internazionali delineate, la *Tabella 1.5* sintetizza i principali accordi e programmi che influenzano direttamente o indirettamente le strategie di raffrescamento passivo e la riduzione della domanda energetica nel settore edilizio.

| Iniziativa              | Anno | Natura dello strumento                  | Obiettivo principale                                   | Rilevanza per il raffrescamento passivo                                                                |
|-------------------------|------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Accordo di Parigi       | 2015 | Accordo multilaterale quadro            | Limitare il riscaldamento globale a 1,5–2 °C           | Implicita: riduzione dei consumi energetici e decarbonizzazione dell'edilizia                          |
| Emendamento di Kigali   | 2016 | Accordo settoriale vincolante           | Phase-down globale degli HFC                           | Indiretta: riduce l'impatto dei sistemi attivi, rafforzando l'importanza della riduzione della domanda |
| Clean Cooling Coalition | 2017 | Piattaforma di advocacy e cooperazione  | Accelerare il clean cooling e il phase-out degli F-gas | Esplicita: promozione di strategie passive, bioclimatiche e <i>load reduction</i>                      |
| Global Cooling Watch    | 2021 | Piattaforma analitica e di monitoraggio | Quantificare domanda, emissioni e scenari di cooling   | Evidenzia i benefici quantitativi della <i>load reduction</i>                                          |
| Global Cooling Pledge   | 2023 | Impegno politico multilaterale          | –68% emissioni da raffrescamento entro 2050            | Esplicita: approccio <i>passive-first</i> + efficienza + refrigeranti low-GWP                          |



## 1.4 Strategie europee per la transizione energetica e climatica

Gli impegni e le piattaforme di cooperazione sviluppati a scala globale costituiscono il presupposto entro cui si inseriscono le strategie regionali, che traducono tali indirizzi in visioni politiche coerenti con i contesti economici e istituzionali di riferimento.

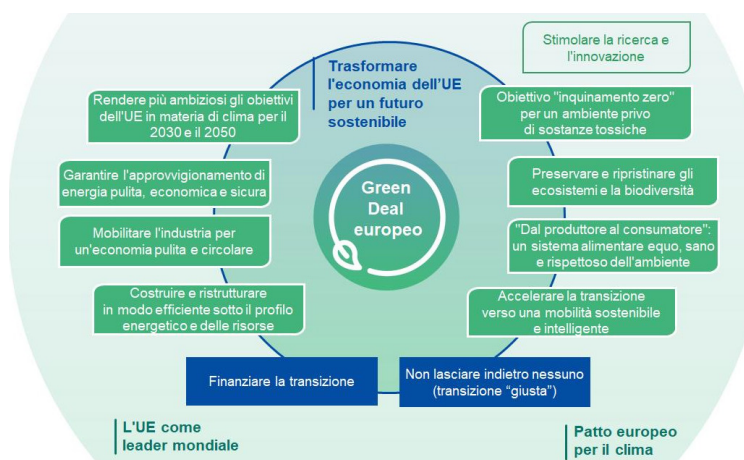
### 1.4.1 *Green Deal europeo*

Il *Green Deal europeo*<sup>13</sup> costituisce la principale strategia dell'Unione europea per affrontare in modo sistematico e trasversale la crisi climatica e ambientale, delineando un piano di crescita sostenibile finalizzato alla trasformazione dell'economia europea verso modelli a basse emissioni di carbonio e ad alta efficienza nell'uso delle risorse. La visione alla base del *Green Deal* prevede che l'Unione diventi il primo continente climaticamente neutro entro il 2050, attraverso il raggiungimento di un equilibrio tra le emissioni antropiche di gas a effetto serra e la capacità di assorbimento degli ecosistemi naturali, con l'obiettivo di ridurre l'inquinamento e ripristinare un equilibrio ambientale duraturo (COM 2019). Si distingue per il suo approccio integrato e trasversale, che supera la tradizionale separazione tra politiche ambientali ed economiche. La sostenibilità viene infatti posta al centro dell'azione dell'Unione e diventa il principio guida di tutte le politiche pubbliche, interessando ambiti quali l'energia, i trasporti, l'industria, l'agricoltura, l'edilizia e la finanza. In tale prospettiva, la strategia promuove un modello di sviluppo sostenibile fondato sulla transizione verso un'economia circolare, sulla diffusione delle fonti di energia rinnovabile, sull'aumento dell'efficienza energetica e sulla riduzione dell'inquinamento, con l'obiettivo di dissociare la crescita economica dallo sfruttamento intensivo delle risorse naturali (COM 2019).

La transizione energetica rappresenta uno degli elementi cardine della strategia climatica e industriale dell'Unione, risultando essenziale per la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, per il rafforzamento dell'autonomia energetica e per il conseguimento degli obiettivi di neutralità climatica al 2050. La produzione e l'uso

<sup>13</sup> Il Green Deal europeo (European Green Deal, EGD) è la strategia di crescita dell'UE lanciato nel 2019 dalla Commissione von der Leyen e consiste in un pacchetto di iniziative strategiche che hanno avviato l'UE sulla strada di una transizione verde, con l'obiettivo ultimo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050.

*Figura 1.13 The European Green Deal: immagine contenuta nella Comunicazione della Commissione europea dell'11/12/2019, n. 640. La versione ufficiale in lingua inglese è consultabile in <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640&qid=1614682926588>.*



dell'energia sono infatti responsabili di circa il 75 % delle emissioni totali dell'Unione europea, rendendo necessario un cambiamento profondo dei modelli di generazione e consumo energetico al fine di contrastare il cambiamento climatico e accrescere la resilienza del sistema energetico europeo (Figura 1.13) (COM 2024a).

Sebbene il *Green Deal* europeo non menzioni esplicitamente il raffrescamento passivo tra i propri obiettivi, tale approccio rientra pienamente nel quadro strategico delineato per il settore edilizio. In particolare, tale strategia funge da cornice di riferimento per l'integrazione di misure orientate alla decarbonizzazione degli edifici e alla riduzione dei consumi energetici, offrendo indirizzi normativi e strumenti di policy coerenti con la transizione climatica globale delineata dall'Accordo di Parigi e con gli impegni europei aggiornati in materia di mitigazione e adattamento. In questo contesto, le azioni previste dal *Green Deal*, quali il pacchetto legislativo Fit for 55<sup>14</sup> e le revisioni delle direttive sull'efficienza energetica e sulla prestazione energetica degli edifici, contribuiscono a creare le condizioni regolatorie e di mercato necessarie a sostenere la diffusione di strategie di raffrescamento passivo e l'adozione di tecnologie ad alta efficienza, in coerenza con gli obiettivi di decarbonizzazione e di adattamento climatico del settore edilizio.

La complessità di tale strategia europea ha richiesto la definizione di linee di azione specifiche per i diversi settori interessati. In questa prospettiva, la presente trattazione si concentra sugli ambiti del "Clima" e dell'Energia", quali riferimenti centrali del quadro strategico europeo.

14. Il pacchetto legislativo Fit for 55 costituisce il principale strumento normativo attraverso il quale l'Unione europea intende tradurre gli obiettivi di mitigazione climatica del Green Deal in azioni concrete e vincolanti per gli Stati membri e i settori economici.

#### 1.4.1.1 La strategia climatica del *Green Deal* europeo

La strategia climatica del Green Deal europeo fornisce il quadro di riferimento entro cui si collocano le politiche settoriali dell'Unione, definendo obiettivi di lungo periodo e tappe intermedie per la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra.

Obiettivi in materia di cambiamento climatico (COM 2025a):

- raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, riducendo drasticamente le emissioni nette di gas a effetto serra e compensando le emissioni residuali attraverso assorbimenti naturali o meccanismi di rimozione;
- conseguire una riduzione delle emissioni nette di almeno il 55 % entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, attraverso impegni giuridici vincolanti e un pacchetto di misure che interessano numerosi settori economici;
- promuovere progressivamente ulteriori target climatici intermedi, come la proposta di riduzione del 90 % entro il 2040, per mantenere una traiettoria coerente verso l'obiettivo di lungo periodo;
- ridurre le emissioni in tutti i settori economici, compresi trasporti, industria, agricoltura, uso del suolo e gestione dei rifiuti, attraverso normative specifiche e strumenti di monitoraggio;
- costruire meccanismi di governance e controllo, rafforzando la legislazione climatica con obblighi vincolanti e sistemi di revisione periodica per valutare i progressi e adeguare le politiche nel tempo.

#### 1.4.1.2 La strategia energetica del *Green Deal* europeo

L'obiettivo generale della strategia è la realizzazione di un sistema energetico integrato, in grado di fornire servizi energetici a basse emissioni di carbonio in modo affidabile, flessibile ed economicamente sostenibile. L'integrazione del sistema energetico è intesa come la pianificazione e il funzionamento coordinati dei diversi vettori energetici (elettricità, gas e calore), delle infrastrutture e dei settori di consumo, al fine di ridurre sprechi, perdite di energia e inefficienze strutturali che caratterizzano l'attuale modello basato su filiere separate (COM 2020).

Un primo pilastro della strategia è rappresentato dal principio dell'"efficienza energetica al primo posto", che assume un ruolo guida nell'orientamento delle politiche energetiche e settoriali. La Commissione evidenzia come la riduzione della domanda energetica costituisca l'opzione più efficace ed economicamente vantaggiosa

per contenere le emissioni di gas a effetto serra, ridurre gli investimenti infrastrutturali necessari e limitare gli impatti ambientali complessivi. In tale contesto, l'efficienza energetica risulta strettamente connessa alla progettazione degli edifici, alla ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente e alla riduzione dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento.

Un secondo obiettivo strategico riguarda la progressiva elettrificazione dei consumi finali, basata su una produzione di energia elettrica sempre più alimentata da fonti rinnovabili. Secondo la strategia, la quota di elettricità nel consumo finale di energia è destinata a crescere in modo significativo entro il 2030 e ulteriormente entro il 2050, in particolare nei settori dell'edilizia, dei trasporti e dell'industria. Un ulteriore obiettivo riguarda lo sviluppo e l'integrazione di combustibili rinnovabili e a basse emissioni di carbonio, destinati in particolare ai settori in cui l'elettrificazione diretta risulta tecnicamente complessa o economicamente inefficiente. In questo ambito, la strategia attribuisce un ruolo crescente all'idrogeno rinnovabile, ai biocarburanti avanzati e ai combustibili sintetici, sottolineando la necessità di definire un adeguato quadro normativo e sistemi di certificazione in grado di garantirne la sostenibilità lungo l'intero ciclo di vita (COM 2020).

Obiettivi nel settore dell'energia (COM 2024b):

- la riduzione del consumo energetico complessivo, con target quantitativi sui risparmi di energia primaria e finale attraverso misure di efficienza energetica in settori ad alta intensità di consumo quali edifici, industria e trasporti;
- la decarbonizzazione del settore energetico, favorendo la sostituzione dei combustibili fossili con fonti di energia rinnovabile e pulita, con specifici obiettivi settoriali per la quota di energia rinnovabile nel mix energetico e nella generazione complessiva;
- il potenziamento dell'efficienza energetica attraverso normative e incentivi che riducono gli sprechi e migliorano l'efficienza del sistema, contribuendo a diminuire emissioni, inquinamento e costi per i consumatori;
- la promozione di tecnologie energetiche avanzate, come idrogeno rinnovabile, gas decarbonizzati e infrastrutture digitali integrate, per favorire l'innovazione e la convergenza dei diversi segmenti del sistema energetico;
- la transizione verso un sistema di energia più interconnesso e resiliente, sviluppando reti energetiche integrate e infrastrutture trasversali tra gli Stati membri, in modo da supportare una distribuzione efficiente e sicura dell'energia pulita.

## 1.5 Dalle strategie alle norme: il pacchetto legislativo UE per il clima e l'energia (Fit for 55)

La strategia europea di lungo periodo in materia climatica ed energetica richiede l'adozione di strumenti normativi in grado di rendere gli obiettivi fissati misurabili e giuridicamente vincolanti, favorendone l'attuazione concreta attraverso interventi legislativi mirati. In questo contesto, il pacchetto "Fit for 55" rappresenta il quadro normativo mediante il quale l'Unione europea adegua la propria legislazione agli obiettivi di riduzione delle emissioni, prevedendo una diminuzione delle emissioni nette di gas a effetto serra di almeno il 55 % entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 (Figura 1.14).

Il pacchetto si caratterizza per un approccio integrato e multisettoriale, volto a rafforzare gli strumenti esistenti e a introdurre nuove misure capaci di garantire una riduzione strutturale delle emissioni. Dal punto di vista tecnico, Fit for 55 si fonda su tre direttrici principali: il rafforzamento del prezzo del carbonio tramite la revisione del sistema EU ETS, l'innalzamento degli obiettivi vincolanti in materia di efficienza energetica e di fonti rinnovabili, e l'introduzione di standard più stringenti per i settori a maggiore intensità emissiva, tra cui quello edilizio.

In particolare, la revisione della normativa sull'efficienza energetica e il potenziamento delle politiche di ristrutturazione del patrimonio edilizio mirano a ridurre in modo significativo il fabbisogno energetico degli edifici, includendo i consumi legati ai servizi di riscaldamento e raffrescamento.

Pur in assenza di riferimenti espliciti al raffrescamento passivo, l'enfasi posta sulla riduzione della domanda energetica, in coerenza con il principio dell'“efficienza energetica al primo posto”, favorisce indirettamente l'adozione di strategie progettuali passive, quali la riduzione dei carichi termici estivi e il miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio, quali leve fondamentali per il raggiungimento degli obiettivi climatici (COM 2021a, 2025b).



**Figura 1.14** Schema illustrativo delle principali misure previste dal pacchetto legislativo Fit for 55 per la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra di almeno il 55 % entro il 2030. L'immagine sintetizza l'approccio integrato dell'Unione europea, che coinvolge i settori dell'energia, dei trasporti, dell'industria, dell'edilizia, dell'uso del suolo e della fiscalità climatica, evidenziando il ruolo congiunto di decarbonizzazione, efficienza energetica e innovazione tecnologica nel raggiungimento degli obiettivi climatici. Fonte: Consiglio dell'Unione europea, Fit for 55 – Politiche dell'UE, immagine istituzionale, <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/fit-for-55/>

15. La Direttiva (EU) 2024/1275, pubblicata il 8 maggio 2024 ed entrata in vigore il 28 maggio, costituisce la versione revisione (recast) della Energy Performance of Buildings Directive e definisce un nuovo quadro normativo per la prestazione energetica degli edifici nell'Unione Europea con l'obiettivo di raggiungere un patrimonio edilizio a emissioni nette zero entro il 2050. La direttiva si applica sia agli edifici di nuova costruzione sia alle strutture esistenti, per quanto riguarda non solo l'efficienza energetica, ma anche l'integrazione di fonti rinnovabili e la qualità ambientale interna, tenendo conto delle condizioni climatiche esterne e delle specificità locali degli Stati membri ed introduce requisiti prestazionali più stringenti, nuovi metodi di calcolo della prestazione energetica e misure volte a migliorare l'efficienza energetica, il comfort interno e la resilienza climatica degli edifici, includendo esplicitamente strategie di prevenzione del surriscaldamento e di raffrescamento passivo.

16. A livello europeo, i CDD sono esplicitamente considerati nel contesto delle direttive e dei regolamenti sull'efficienza energetica. La Direttiva 2010/31/UE (EPBD – Energy Performance of Buildings Directive) e successive modifiche enfatizzano la necessità di tener conto delle condizioni climatiche locali (oltre che della qualità dell'involucro e degli impianti) nel calcolo della prestazione energetica degli edifici. Pur non menzionando singolarmente i "Cooling Degree Days", l'EPBD ha spinto gli Stati

### 1.5.1 Regolazione del settore edilizio: evoluzione della Direttiva sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD – Energy Performance of Buildings Directive) e quadro prestazionale degli edifici (EPBD dal 2010 al recast 2024-Direttiva Case Green 24 aprile)

In continuità con il percorso normativo avviato dal Green Deal europeo e consolidato attraverso il pacchetto Fit for 55, la Direttiva (UE) 2024/1275<sup>15</sup> rappresenta il più recente e avanzato strumento di regolazione del settore edilizio in materia di efficienza energetica e decarbonizzazione. Introdotta per la prima volta nel 2002, la direttiva ha come obiettivo quello di ridurre i consumi energetici e le emissioni climalteranti associate agli edifici, promuovendo una progettazione orientata alle prestazioni e una progressiva decarbonizzazione del settore edilizio. Nel tempo, la EPBD ha assunto un ruolo sempre più centrale nel quadro delle politiche europee per il clima e l'energia, in quanto il settore degli edifici rappresenta una delle principali fonti di domanda energetica e di emissioni di CO<sub>2</sub> a livello continentale. Fin dalle sue prime formulazioni, la direttiva ha introdotto concetti chiave quali i requisiti minimi di prestazione energetica, la certificazione energetica degli edifici e la valutazione delle prestazioni in condizioni di utilizzo reale. Tuttavia, è soprattutto attraverso i successivi aggiornamenti che la EPBD ha progressivamente ampliato il proprio campo di applicazione, passando da un approccio inizialmente focalizzato sul fabbisogno energetico complessivo a una visione più integrata, che include aspetti legati al comfort interno, alla qualità ambientale e alla resilienza climatica.

Nel corso degli anni, la EPBD è stata oggetto di numerose revisioni che ne hanno rafforzato l'impatto e ampliato gli obiettivi:

- EPBD 2002/91/CE

Introduzione del quadro comune europeo per la prestazione energetica degli edifici, con i primi requisiti minimi e l'obbligo di certificazione energetica.

- EPBD recast 2010/31/UE<sup>16</sup>

Rafforzamento dei requisiti prestazionali e introduzione del concetto di edificio a energia quasi zero (nZEB), con particolare attenzione alla qualità dell'involucro e alla riduzione dei fabbisogni energetici.

- Revisione 2018/844/UE

Integrazione con il pacchetto "Clean Energy for All Europeans", maggiore attenzione alla qualità ambientale interna, all'automazione degli edifici e alla necessità di considerare le condizioni operative reali, comprese quelle estive.

- Revisione 2023-2024 (EPBD recast)



Inserimento esplicito degli obiettivi di neutralità climatica al 2050, maggiore enfasi sulla riduzione della domanda energetica, sulla resilienza climatica, sulla valutazione del rischio di surriscaldamento e sull'importanza delle soluzioni passive come primo livello di intervento (Figura 1.15).

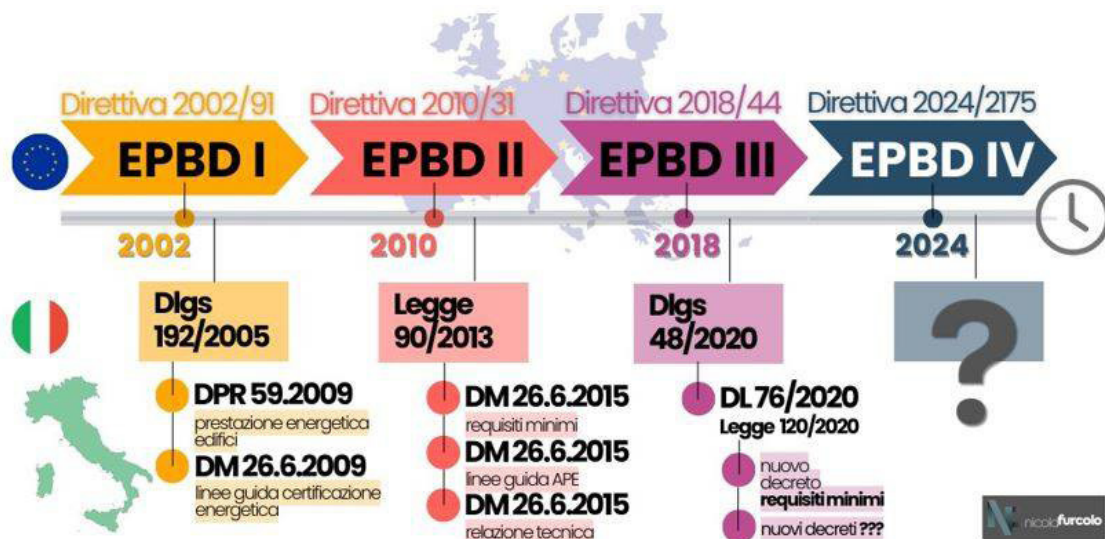
In tale contesto, la nuova EPBD attribuisce un'importanza esplicita al raffrescamento passivo quale leva fondamentale per il miglioramento della prestazione energetica e per il rafforzamento della resilienza climatica degli edifici. Infatti come citato nel punto 70<sup>17</sup>:

<<Recent years have seen a rise in the number of air-conditioning systems in European countries. That creates considerable problems at peak load times, increasing the cost of electricity and disrupting the energy balance. Priority should be given to strategies which enhance the thermal performance of buildings during the summer period. To that end, there should be a focus on measures which avoid overheating, such as shading and sufficient thermal capacity in the building construction, and further development and application of passive cooling techniques, primarily those that improve indoor environmental quality, the micro-climate around buildings and the urban heat island effect.>>

membri a sviluppare metodologie di calcolo normalizzate sul clima, dove gli indici grado-giorno sono spesso impiegati per rappresentare la severità del clima sia in inverno che in estate definito dalla norma UNI 10349-3:2016.

17. La Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 aprile 2024, sulla prestazione energetica degli edifici (rifusione), considerando 70, GU L 1275 dell'8.5.2024, disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng>

*Figura 1.15 Evoluzione del quadro normativo europeo e italiano in materia di prestazione energetica degli edifici (EPBD I-IV), con indicazione dei principali recepimenti nazionali e dei decreti attuativi che hanno progressivamente definito requisiti minimi, certificazione energetica e metodologie di calcolo.*



Attraverso l'integrazione di strategie quali ventilazione naturale, ombreggiamento, inerzia termica e progettazione bioclimatica nei metodi di calcolo della prestazione energetica, la direttiva promuove un approccio progettuale orientato alla prevenzione del surriscaldamento estivo e alla riduzione strutturale dei carichi termici. In questo modo, quest'ultima consolida il passaggio dalle strategie climatiche generali a una normativa tecnica capace di incidere direttamente sulle scelte progettuali, ponendo il raffrescamento passivo come primo livello di intervento per una decarbonizzazione efficace e duratura dell'ambiente costruito (Directive (EU) 2024/1275 2024). Inoltre, i nuovi metodi di calcolo della prestazione energetica sono chiamati a incorporare in modo sistematico tali soluzioni, orientando la progettazione architettonica verso un approccio capace di anticipare e mitigare l'aumento delle temperature estive, come previsto dall'articolo 4 e dall'allegato IV. In questo quadro, l'articolo 11 evidenzia la necessità di valutare la prestazione energetica degli edifici attraverso un'impostazione integrata che consideri congiuntamente le condizioni climatiche esterne, il comportamento dell'involucro edilizio e il livello di comfort interno, includendo il controllo del surriscaldamento estivo tra gli aspetti prestazionali prioritari da affrontare.

La revisione più recente della Direttiva sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD) introduce una serie di aggiornamenti rilevanti che rafforzano il quadro normativo europeo in materia di efficienza energetica e prestazione degli edifici; tuttavia, ai fini della presente ricerca, l'attenzione è focalizzata esclusivamente su quegli aspetti che risultano maggiormente pertinenti rispetto al tema del raffrescamento passivo e alla prevenzione del surriscaldamento estivo, in quanto direttamente connessi alle prestazioni climatiche dell'involucro edilizio, al comfort interno e alla riduzione della domanda energetica:

- **Maggiore enfasi sulla riduzione della domanda energetica**  
La direttiva privilegia esplicitamente la riduzione dei fabbisogni energetici a monte, prima del ricorso a impianti efficienti o fonti rinnovabili, rafforzando il principio "energy efficiency first", stabilendo che tali livelli siano almeno il 10 % più bassi rispetto alle soglie già definite per gli edifici quasi neutrali al momento dell'entrata in vigore della direttiva.
- **Considerazione esplicita delle condizioni climatiche esterne**  
La prestazione energetica deve essere valutata tenendo conto del clima locale, delle condizioni estive e del rischio di surriscaldamento, aspetto cruciale per i climi mediterranei.
- **Rafforzamento del controllo del surriscaldamento estivo**



Pur senza imporre soluzioni progettuali specifiche, la EPBD richiede che gli edifici garantiscano comfort interno anche in condizioni estive critiche, incentivando l'adozione di strategie passive di raffrescamento.

- Approccio basato sul ciclo di vita  
Maggiore attenzione agli impatti energetici e ambientali lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio, rafforzando il valore delle soluzioni passive durevoli e a bassa intensità tecnologica.
- Rafforzamento della qualità ambientale interna (IEQ)  
La direttiva riconosce il legame tra prestazione energetica, comfort termico e salute degli occupanti, superando una visione esclusivamente quantitativa dei consumi.  
Nel loro insieme, le politiche e le iniziative europee richiamate delineano un percorso coerente e progressivo che, partendo da una visione strategica di lungo periodo, si traduce in strumenti normativi sempre più specifici e vincolanti, all'interno dei quali il tema del raffrescamento passivo emerge come componente trasversale e strutturale delle politiche per l'efficienza energetica, la resilienza climatica e la qualità dell'ambiente costruito.

*Tabella 1.6 Evoluzione della Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) e progressiva integrazione dei temi di efficienza energetica, prestazioni climatiche degli edifici e strategie di raffrescamento passivo nel quadro normativo dell'Unione Europea. Fonte: K.Mitrik*

| Anno | Normativa / Revisione                  | Livello | Obiettivo generale                                                                                                                                   | Rilevanza per il raffrescamento                                                                                                                                                                                                                   |
|------|----------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2002 | EPBD 2002/91/CE                        | UE      | Introduzione del quadro comune europeo per la prestazione energetica degli edifici; definizione dei requisiti minimi e certificazione energetica     | Implicita: focus prevalentemente sui consumi energetici globali, senza distinzione esplicita tra regime estivo e invernale                                                                                                                        |
| 2010 | EPBD Recast 2010/31/UE                 | UE      | Rafforzamento dei requisiti prestazionali; introduzione del concetto di edificio a energia quasi zero (nZEB)                                         | Indiretta: maggiore attenzione alla qualità dell'involucro edilizio e alla riduzione dei fabbisogni energetici, con effetti anche sul comportamento estivo                                                                                        |
| 2018 | Direttiva (UE) 2018/844                | UE      | Integrazione con il pacchetto "Clean Energy for All Europeans"; rafforzamento della riqualificazione edilizia e dei sistemi di automazione           | Crescente: introduzione del comfort e delle condizioni operative reali; riconoscimento implicito dell'importanza delle prestazioni estive                                                                                                         |
| 2024 | Direttiva (UE) 2024/1275 (EPBD recast) | UE      | Percorso vincolante verso edifici a zero emissioni operative (ZEB); integrazione tra efficienza energetica, decarbonizzazione e resilienza climatica | Esplicita e strutturale: riconoscimento del rischio di surriscaldamento estivo; promozione di strategie di raffrescamento passivo (ombreggiamento, ventilazione naturale, inerzia termica, progettazione bioclimatica); approccio "passive-first" |

## 1.6 Il contesto culturale e legislativo della ricerca in ambito nazionale (PNIEC e PNRR)

18. Il Regolamento Effort Sharing (Regolamento (UE) 2018/842, successivamente modificato dal pacchetto legislativo Fit for 55) stabilisce obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra per ciascuno Stato membro nei settori non coperti dal sistema EU ETS, tra cui trasporti, edifici, agricoltura e rifiuti. Il regolamento definisce traiettorie emissive nazionali coerenti con gli obiettivi climatici dell'Unione Europea al 2030, lasciando agli Stati la scelta delle politiche e delle misure necessarie al conseguimento dei target assegnati.

L'efficacia delle strategie e delle direttive europee analizzate nei paragrafi precedenti dipende in larga misura dalla loro capacità di essere recepite e tradotte in strumenti operativi a livello nazionale. In Italia, questo passaggio avviene principalmente attraverso piani di governance e programmi di investimento che trasformano gli obiettivi europei in traiettorie quantitative, misure settoriali e risorse finanziarie. In tale quadro, il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) e il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) rappresentano i due assi portanti della politica nazionale recente su clima ed energia: il primo definisce obiettivi e politiche al 2030; il secondo mobilita investimenti e riforme (anche nel settore edilizio) per accelerare la transizione e rafforzare resilienza e modernizzazione del Paese. La necessità di un'accelerazione è evidenziata anche dagli indicatori emissivi: sulla base dell'ultimo inventario nazionale delle emissioni e delle proiezioni ufficiali ISPRA, l'Italia ha registrato una riduzione significativa delle emissioni di gas serra rispetto all'anno base 1990, ma con un andamento che resta non pienamente coerente con la traiettoria richiesta dagli obiettivi europei al 2030. In particolare, nel periodo 1990–2023 le emissioni nazionali complessive sono diminuite di circa 26–28%, passando da oltre 536 MtCO<sub>2</sub>eq nel 1990 a valori prossimi ai 390 MtCO<sub>2</sub>eq nel 2023. Tuttavia, secondo lo scenario di riferimento a politiche correnti elaborato da ISPRA, l'Italia non risulta in grado di raggiungere il target di riduzione del –43,7% al 2030 rispetto al 2005 previsto dal Regolamento *Effort Sharing*<sup>18</sup>, anche includendo le misure già adottate fino al 2022 (ISPRA 2025). Il rapporto evidenzia come, a fronte di miglioramenti consistenti nelle prestazioni invernali degli edifici, la crescente incidenza delle ondate di calore e l'aumento della domanda di raffrescamento estivo rischiano di compensare parte dei benefici ottenuti, soprattutto in assenza di una diffusione sistematica di strategie passive di riduzione dei carichi termici. Ne deriva che il conseguimento degli obiettivi climatici nazionali al 2030 e al 2050 dipende in misura crescente dalla capacità di ridurre la domanda energetica a monte, in particolare nel setto-

re edilizio, attraverso interventi sull'involucro, sul comportamento estivo degli edifici e sull'adozione di soluzioni di raffrescamento passivo, in linea con le indicazioni del PNIEC, che vedremo successivamente, con il quadro europeo del Green Deal e del pacchetto Fit for 55 (COM 2019).

### 1.6.1 Il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC)

Nell'attuale scenario di transizione ecologica ed energetica, il quadro normativo italiano si struttura attraverso strumenti strategici multilivello, volti a guidare la decarbonizzazione del settore edilizio e a promuovere l'efficienza energetica. In particolare, il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) delinea gli obiettivi al 2030 in linea con il Green Deal europeo, fissando azioni concrete su fonti rinnovabili, efficienza e riduzione delle emissioni (COM 2019; MASE 2019). Il PNIEC rappresenta il principale strumento di pianificazione attraverso il quale l'Italia, in coerenza con il sistema di governance europea dell'Unione dell'energia e dell'azione per il clima, definisce il proprio contributo agli obiettivi al 2030 in materia di riduzione delle emissioni, miglioramento dell'efficienza energetica, sviluppo delle fonti rinnovabili, sicurezza degli approvvigionamenti, funzionamento del mercato interno dell'energia e promozione dell'innovazione. Il piano costituisce, inoltre, il quadro di riferimento per l'attuazione delle politiche nazionali in ambito energetico e climatico, assicurando l'allineamento con il complesso normativo europeo sulla transizione ecologica (Lutman 2020; Perpignani 2023). Nella sua versione più recente trasmessa nel 2024, il piano rafforza l'ambizione nazionale nel percorso verso la neutralità climatica, indicando una traiettoria che combina aumento delle rinnovabili, riduzione dei consumi e trasformazione dei settori finali. A titolo indicativo, il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica richiama, tra gli obiettivi cardine, lo sviluppo accelerato delle rinnovabili (con un ordine di grandezza di 131 GW al 2030) e l'allineamento ai target europei di riduzione emissiva (MASE 2024). Tale documento, elaborato in ottemperanza al Regolamento (UE) 2018/1999, costituisce un atto di pianificazione decennale, sottoposto ad aggiornamenti periodici, che integra in modo trasversale e coordinato le dimensioni dell'energia e del clima (UE 2018). Per la presente ricerca, il PNIEC è rilevante soprattutto perché colloca il settore degli edifici e dei consumi termici tra le leve principali della transizione: la riduzione della domanda energetica e l'elettrificazione efficiente (anche attraverso pompe di calore) sono infatti stret-

tamente collegate all'evoluzione dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento. In questo senso, l'attenzione al comparto "heating & cooling" non riguarda solo la sostituzione tecnologica degli impianti, ma anche la qualità prestazionale dell'involucro e la riduzione dei carichi, che costituiscono il presupposto tecnico per contenere l'aumento della domanda estiva legata alle ondate di calore. La dimensione "raffrescamento", pur non sempre trattata con la stessa evidenza del riscaldamento, entra quindi nel PNIEC come tema strutturale: da un lato per gli obiettivi settoriali (che includono il riscaldamento e raffrescamento), dall'altro perché la riduzione dei fabbisogni negli edifici è condizione necessaria per evitare che la decarbonizzazione venga "assorbita" da una crescita della domanda elettrica estiva (MASE 2024).

Il piano si articola lungo cinque dimensioni principali, quali decarbonizzazione, efficienza energetica, sicurezza energetica, mercato interno dell'energia e ricerca e innovazione, con una forte enfasi trasversale sulla riduzione strutturale della domanda energetica. In tale prospettiva, il settore edilizio assume un ruolo centrale, in quanto responsabile di una quota significativa dei consumi finali e delle emissioni non ETS. Il PNIEC individua infatti negli edifici residenziali e terziari uno dei principali ambiti di intervento per il conseguimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni fissati dal Regolamento Effort Sharing come citato precedentemente, che per l'Italia prevede una riduzione del 43,7% delle emissioni al 2030 rispetto ai livelli del 2005 (MASE 2019).

### 1\_Decarbonizzazione

Mira alla riduzione delle emissioni di gas serra e all'incremento delle fonti energetiche rinnovabili. L'obiettivo italiano è di ridurre del 55% le emissioni di CO<sub>2</sub> rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030 e aumentare la quota delle rinnovabili al 40% dei consumi finali lordi. Tale processo richiede una cooperazione globale e sforzi congiunti

*Figura 1.16 Schema delle linee strategiche del Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), articolato in cinque ambiti di intervento integrati. Fonte: Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica — Pubblicato il testo definitivo del Piano Energia e Clima (PNIEC), disponibile all'indirizzo: <https://www.mase.gov.it/portale/-/pubblicato-il-testo-definitivo-del-piano-energia-e-clima-pniec>*



da parte di governi, industrie e cittadini per ridurre le emissioni e garantire un futuro più sostenibile per il nostro pianeta. Il punto debole del PNIEC è la mancanza, all'interno del Piano, delle indicazioni operative che chiariscano come raggiungere gli obiettivi entro il 2030 (Perpignani 2023).

## **2\_Efficienza energetica**

Promuove l'uso razionale dell'energia in tutti i settori, con una riduzione dei consumi di energia primaria e finale. Il PNIEC prevede una riduzione della domanda di energia primaria del 43,6% entro il 2030 (rispetto allo scenario tendenziale).

## **3\_Sicurezza energetica**

Intende diversificare le fonti e le rotte di approvvigionamento energetico, incrementare la resilienza delle infrastrutture e ridurre la dipendenza da fonti fossili.

## **4\_Sviluppo del mercato dell'energia**

Mira alla piena integrazione del mercato energetico italiano in quello europeo, garantendo concorrenza, trasparenza e l'empowerment del consumatore finale.

## **5\_Ricerca, innovazione e competitività**

Promuove lo sviluppo di tecnologie innovative per la transizione energetica e sostiene l'industria nazionale nel rafforzamento della competitività nel settore energetico sostenibile (*Figura 1.16*).

Sebbene il PNIEC definisca obiettivi coerenti con il quadro europeo di governance climatica ed energetica, alcuni monitoraggi indipendenti evidenziano criticità nell'adeguatezza delle misure previste per conseguire tali target entro il 2030. Secondo il Monitor PNIEC elaborato da AGICI e riportato da fonti di settore, l'Italia potrebbe non raggiungere i target nazionali di riduzione delle emissioni e di efficienza energetica a causa degli impegni correnti, con consumi energetici primari e finali stimati superiori ai livelli richiesti dai target europei e una quota di energie rinnovabili prevista leggermente al di sotto di quanto inizialmente proposto nel piano. In particolare, la dimensione dell'efficienza energetica risulta tra le più critiche: lo sforzo dell'Italia, analogamente a quello di altri Stati membri, risulta insufficiente per conseguire gli obiettivi nazionali di riduzione dei consumi entro il 2030, evidenziando la necessità di politiche più incisive e di un'accelerazione degli interventi strategici su efficienza e decarbonizzazione (Azzini 2025).

### **1.6.2 Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)**

Accanto al PNIEC, come secondo pilastro della legislazione energetica, vi è il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) che

costituisce il principale strumento operativo e finanziario della politica nazionale recente, attraverso cui l'Italia mobilita investimenti e riforme per sostenere la transizione ecologica, la modernizzazione infrastrutturale e la resilienza del sistema economico e sociale. Finanziato nell'ambito del programma europeo Next Generation EU, il Piano rappresenta un passaggio cruciale nell'attuazione concreta degli obiettivi climatici ed energetici. Nel PNRR presentato nel 2021, il Governo indica l'intenzione di richiedere il massimo delle risorse RRF disponibili per l'Italia, pari a 191,5 miliardi di euro, suddivisi in 68,9 miliardi di sovvenzioni e 122,6 miliardi di prestiti. La logica del Piano è fortemente "a performance": l'erogazione delle risorse avviene al raggiungimento di milestone e target concordati con la Commissione europea (Camera dei deputati 2021). Dal punto di vista della struttura, il PNRR è articolato in sei Missioni e 16 Componenti (Camera dei deputati 2021; MIMIT 2022), con l'obiettivo di sostenere la doppia transizione verde e digitale, aumentando resilienza economica e sociale. A livello di vincoli europei, è richiesto che almeno il 37% delle risorse sia destinato alla transizione verde e almeno il 20% alla transizione digitale; nella configurazione originaria, il PNRR italiano destinava il 40% alla transizione ecologica e il 27% alla transizione digitale (Presidenza del Consiglio dei Ministri 2021).

Dal punto di vista strutturale, il Piano si articola in sei Missioni, che organizzano in modo sistemico le aree di intervento:

M1 – Digitalizzazione, innovazione, competitività, cultura e turismo: 40,29 mld €;

M2 – Rivoluzione verde e transizione ecologica: 59,46 mld €;

M3 – Infrastrutture per una mobilità sostenibile: 25,40 mld €;

M4 – Istruzione e ricerca: 30,88 mld €;

M5 – Inclusione e coesione: 19,81 mld €;

M6 – Salute: 15,63 mld €

Questa architettura evidenzia la natura trasversale del Piano, nel quale la sostenibilità ambientale e l'innovazione tecnologica non costituiscono ambiti settoriali isolati, ma principi guida dell'intero programma di riforme e investimenti.

#### 1.6.2.1 La Missione 2: "Rivoluzione Verde e Transizione Ecologica"

Particolare rilevanza, in relazione ai temi della presente ricerca, assume la Missione 2: "Rivoluzione Verde e Transizione Ecologica", che prevede lo stanziamento di 68,6 miliardi complessivi (59,5 miliardi dal Dispositivo RRF e 9,1 dal Fondo) riconosce esplicitamente la necessità di accelerare il percorso verso la neutralità climatica

e di rafforzare la resilienza del sistema territoriale e infrastrutturale nazionale. Il Piano sottolinea infatti come l'Italia sia particolarmente esposta ai cambiamenti climatici, con impatti crescenti associati a eventi estremi, ondate di calore e rischi idrogeologici. In tale prospettiva, la transizione ecologica viene interpretata non esclusivamente come un obiettivo ambientale, ma come un driver di trasformazione economica, tecnologica e sociale. L'efficientamento energetico, la diffusione delle fonti rinnovabili, la riqualificazione del patrimonio edilizio e il rafforzamento delle infrastrutture sostenibili costituiscono assi portanti dell'intervento pubblico. La Missione 2 è articolata in quattro Componenti (Presidenza del Consiglio dei Ministri 2021).:

C1 – Economia circolare e agricoltura sostenibile;

C2 – Energia rinnovabile, idrogeno, rete e mobilità sostenibile;

C3 – Efficienza energetica e riqualificazione degli edifici;

C4 – Tutela del territorio e della risorsa idrica.

La Componente M2C3 esplicita una motivazione chiave: gli edifici rappresentano "più di un terzo" dei consumi energetici del Paese, e una quota significativa del patrimonio edilizio è antecedente alle principali normative sul risparmio energetico. In termini di obiettivi energetici, la stessa sezione collega l'azione sull'edilizia agli obiettivi 2030, richiamando un target di consumi finali pari a 103,8 Mtep e indicando che circa il 35% del risparmio atteso ricadrebbe nel settore edifici.

In questo quadro, il settore edilizio assume un ruolo strategico non solo per il contributo agli obiettivi di riduzione dei consumi energetici, ma anche per la crescente incidenza dei fabbisogni legati al raffrescamento estivo, fenomeno accentuato dalle dinamiche climatiche in atto. In particolare, l'edilizia di tipo non residenziale, caratterizzata da elevati carichi interni, profili d'uso intensivi e significativa dipendenza da sistemi di climatizzazione meccanica, rappresenta uno degli ambiti più critici sotto il profilo della domanda energetica stagionale. Ne deriva che gli interventi di efficientamento e riqualificazione previsti dalla Missione 2, e in particolare dalla Componente M2C3, risultano strettamente connessi alla necessità di contenere la crescita dei carichi termici estivi. In tale prospettiva, le strategie di raffrescamento passivo e di controllo prestazionale dell'involucro edilizio si configurano come strumenti coerenti con la logica complessiva del Piano, poiché consentono di intervenire direttamente sulla riduzione dei fabbisogni energetici, contribuendo simultaneamente agli obiettivi di efficienza, decarbonizzazione e resilienza climatica.

## 1.7 Norme quadro di riferimento Nazionale

La valutazione del comportamento termo-energetico degli edifici si basa su un sistema normativo articolato su scala internazionale, europea e nazionale. Le norme UNI EN ISO, sviluppate nell'ambito del quadro EPB (*Energy Performance of Buildings*), definiscono i principi generali e le procedure di calcolo per la determinazione dei fabbisogni energetici e delle condizioni termo-igrometriche di riferimento. A livello nazionale, le norme UNI recepiscono e declinano tali metodologie nel contesto climatico e regolamentare italiano, disciplinando dati climatici, ventilazione e scambi termici.

L'insieme di questi riferimenti costituisce il quadro tecnico per l'analisi dei carichi di climatizzazione e della prestazione energetica dell'edificio. La selezione dei riferimenti normativi riportati nel presente lavoro è strettamente connessa al tema della tesi, focalizzato sugli edifici non residenziali, sulla prestazione energetica, sulla ventilazione naturale e sulla qualità dell'aria interna. In seguito verranno pertanto analizzate le norme di maggiore rilevanza per tali ambiti, con particolare attenzione alle procedure di calcolo dei fabbisogni energetici e ai criteri di definizione delle portate di ventilazione e delle condizioni ambientali interne.

La selezione delle norme non risponde a un criterio meramente cronologico o gerarchico, bensì a una scelta metodologica coerente con il tema della ricerca.

L'ordine di trattazione segue la struttura logica del modello energetico adottato: si parte dalle norme europee armonizzate del sistema EPB, che definiscono i principi fisici e le procedure di calcolo dei fabbisogni energetici, per poi approfondire i documenti relativi alla determinazione delle portate di ventilazione e dei parametri di comfort termo-igrometrico negli ambienti interni.

Successivamente vengono analizzate le norme relative ai dati climatici di progetto e agli scambi termici con il terreno, che costituiscono gli input ambientali del modello, per concludere con il recepimento nazionale delle procedure di calcolo.



### 1.7.1 UNI EN ISO 52016-1:2018 - Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo

La norma UNI EN ISO 52016-1:2018 si colloca all'interno del più ampio sistema normativo europeo dedicato alla prestazione energetica degli edifici EPB, rappresentando uno dei riferimenti metodologici fondamentali per la determinazione dei fabbisogni energetici per la climatizzazione. Essa fornisce le procedure di calcolo per la valutazione dei carichi termici sensibili e latenti associati ai servizi di riscaldamento e raffrescamento, nonché per la stima delle temperature interne operative, configurandosi come uno strumento centrale per l'analisi del comportamento termo-energetico dell'edificio (UNI EN ISO 52016-1 2018). L'approccio adottato è di tipo bilancistico e si basa sulla descrizione dei flussi di energia che interessano la zona termica, intesa come volume di controllo caratterizzato da condizioni termo-fisiche uniformi. In tale impostazione, il comportamento energetico dell'edificio emerge come risultato dell'interazione tra proprietà dell'involucro, condizioni climatiche, apporti gratuiti e parametri di esercizio.

Dal punto di vista matematico, il modello è riconducibile a un'equazione di bilancio energetico dinamico della zona, nella quale la variazione di energia interna è funzione dei contributi entranti e uscenti. In forma generale, il bilancio può essere espresso come:

$$C_{int} \frac{dT_{op}}{dt} = \Phi_{int} + \Phi_{sol} + \Phi_{HVAC} - \Phi_{tr} - \Phi_{ve}$$

dove:

$C_{int}$  rappresenta la capacità termica interna della zona [J/K]

$T_{op}$  è la temperatura operativa interna [°C o K]

$\Phi_{int}$  indica gli apporti termici interni [W]

$\Phi_{sol}$  i guadagni solari [W]

$\Phi_{HVAC}$  il contributo del sistema impiantistico

$\Phi_{tr}$  le perdite per trasmissione

$\Phi_{ve}$  gli scambi per ventilazione

La temperatura operativa, coerentemente con le definizioni normative, sintetizza gli effetti combinati della temperatura dell'aria e della temperatura media radiante, costituendo la variabile di riferimento per la valutazione delle condizioni di comfort e per la determinazione dei carichi termici.

### Scambi termici per trasmissione

Gli scambi per trasmissione attraverso l'involucro edilizio sono modellati mediante il coefficiente globale di trasmissione termica  $H_{tr}$  [W/K], che rappresenta la capacità dispersiva complessiva dell'involucro. Il flusso termico associato può essere ricondotto alla relazione:

$$\Phi_{tr} = H_{tr} \cdot (T_{int} - T_{ext})$$

dove il coefficiente  $H_{tr}$  deriva dalla somma dei contributi dei singoli elementi edilizi:

$$H_{tr} = \sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k \Psi_k \cdot l_k$$

con:

$U_i$  trasmittanza termica dell'elemento  $i$  [W/(m<sup>2</sup>K)]

$A_i$  area di scambio [m<sup>2</sup>]

$\Psi_k$  trasmittanza lineica del ponte termico  $k$  [W/(mK)]

$l_k$  lunghezza del ponte termico [m]

Questa formulazione evidenzia come il comportamento energetico non dipenda esclusivamente dalle proprietà dei materiali, ma anche dalla configurazione geometrica e dalla continuità dell'involucro.

### Scambi per ventilazione

Gli scambi energetici dovuti ai ricambi d'aria sono espressi tramite il coefficiente di trasferimento termico per ventilazione  $H_{ve}$ , funzione delle portate d'aria e delle proprietà termo-fisiche del fluido:

$$\Phi_{ve} = H_{ve} \cdot (T_{int} - T_{sup})$$

$$H_{ve} = \rho_{air} \cdot c_{air} \cdot q_v$$

dove:

$\rho_{air}$  densità dell'aria [kg/m<sup>3</sup>]

$c_{air}$  calore specifico [J/(kgK)]

$q_v$  portata volumetrica [m<sup>3</sup>/s]

Nel periodo estivo, tali scambi assumono particolare rilevanza, poiché possono determinare sia carichi aggiuntivi sia meccanismi di raffrescamento passivo.

1.7.2.1 UNI EN 16798-1:2019 - Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica

La norma UNI EN 16798-1:2019 si inserisce nel sistema europeo EPB (Energy Performance of Buildings) a supporto della Direttiva 2010/31/UE (EPBD) e dei suoi successivi aggiornamenti. Rappresenta uno dei principali riferimenti europei per la definizione dei parametri di qualità ambientale interna (Indoor Environmental Quality – IEQ) negli edifici. Essa fornisce criteri di progettazione e valutazione delle condizioni termo-igrometriche, della qualità dell'aria interna, dell'umidità e del comfort visivo, introducendo un approccio prestazionale finalizzato a bilanciare benessere degli occupanti ed efficienza energetica (UNI EN 16798-1 2019). Essa non stabilisce requisiti cogenti, ma fornisce criteri tecnici e valori di riferimento per la determinazione delle condizioni di comfort e ventilazione, che incidono direttamente sui fabbisogni energetici.

Un elemento cardine della norma è la classificazione degli ambienti interni in quattro categorie di comfort (I-IV), che esprimono differenti livelli di aspettativa e sensibilità degli utenti. Le categorie più elevate (I e II) sono associate a condizioni più restrittive e quindi a maggiori esigenze impiantistiche, mentre le categorie inferiori (III e IV) consentono margini di accettabilità più ampi, con potenziali benefici sul piano energetico.

Per quanto concerne il comfort termico, la norma adotta sia modelli statici, tipici degli ambienti climatizzati, sia il modello adattivo, applicabile agli edifici naturalmente ventilati. In quest'ultimo caso, la temperatura operativa interna è correlata alla temperatura media esterna esponenzialmente pesata, secondo la relazione:

$$\theta_{op,c} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8$$

dove  $\theta_{rm}$  rappresenta la *running mean outdoor temperature*.

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) (\theta_{ed-1} + \alpha\theta_{ed-2} + \alpha^2\theta_{ed-3} + \dots)$$

con:  $\alpha=0,8$  (valore raccomandato)

Tale formulazione riflette il principio secondo cui gli occupanti sviluppano una capacità di adattamento alle condizioni climatiche esterne, rendendo accettabili temperature interne più variabili rispetto agli edifici completamente climatizzati. I limiti di accettabilità sono definiti in funzione della categoria di comfort, mediante scostamenti ammessi rispetto alla temperatura ottimale.

#### **Effetto della velocità dell'aria**

La norma riconosce che l'aumento della velocità dell'aria consente di tollerare temperature operative più elevate.

Incrementi equivalenti ammessi:

0,6 m/s → +1,2°C

0,9 m/s → +1,8°C

1,2 m/s → +2,2°C

Tale principio è applicabile solo in presenza di controllo diretto da parte dell'occupante.

#### **Ventilazione e qualità dell'aria interna (IAQ)**

La portata totale di ventilazione è definita come:

$$q = q_p + q_B$$

dove:

$q_p$  = contributo degli occupanti

$q_B$  = contributo delle emissioni dell'edificio

Portata minima igienica:

$$q_{min} = 4 \text{ l/s per persona}$$

Valori tipici per occupanti sedentari:

Categoria I → 10 l/s-persona

Categoria II → 7 l/s-persona

Categoria III → 4 l/s-persona

Controllo tramite CO<sub>2</sub>

Differenza rispetto alla concentrazione esterna:

Categoria I → 550 ppm

Categoria II → 800 ppm

Categoria III → 1350 ppm

La CO<sub>2</sub> è utilizzata come indicatore di efficacia della ventilazione.

Umidità interna

La norma non impone obbligo di umidificazione/deumidificazione negli edifici ordinari.

Valori indicativi:

Umidità relativa invernale → 25–40%

Umidità relativa estiva → fino al 60%

Umidità assoluta consigliata → ≤ 12 g/kg

1.7.2.2 UNI EN 16798-7:2018 - Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 7: Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici compresa l'infiltrazione

La UNI EN 16798-7:2018 costituisce il riferimento metodologico per il calcolo delle portate d'aria di ventilazione negli edifici, includendo sia la ventilazione meccanica sia i contributi dovuti a ventilazione naturale, infiltrazioni, camini passivi e apparecchi a combustione. La norma si colloca all'interno del quadro EPB (Energy Performance of Buildings), in particolare nel modulo M5-5, ed è strettamente connessa alla valutazione della prestazione energetica e dei fabbisogni per climatizzazione (UNI EN 16798-7 2018).

L'obiettivo principale della norma è la determinazione delle portate d'aria entranti e uscenti da ciascuna zona di ventilazione in funzione delle condizioni operative (clima esterno, temperatura interna, apertura delle finestre, funzionamento dei sistemi meccanici). Le portate sono calcolate attraverso un bilancio di massa risolto rispetto alla pressione interna di riferimento della zona, assumendo come contributi i diversi percorsi di flusso: terminali meccanici, condotti passivi o ibridi, aperture finestrate, griglie di ventilazione e perdite dell'involucro.

Collegamento con la prestazione energetica

La norma consente di determinare la portata di aria esterna richiesta ai fini energetici:

$$q_{V;ODA;req} = \frac{f_{ctrl} f_{sys}}{\epsilon_v} \cdot q_{V;ODA;req;des}$$

e, nel caso di controllo a carico, la temperatura dell'aria di mandata:

$$\vartheta_{SUP} = \vartheta_z + \frac{Q_H - Q_C}{\rho_a c_a q_{V;SUP}}$$

Tali grandezze costituiscono input per il calcolo del fabbisogno energetico secondo UNI EN ISO 52016-1.

### 1.7.3 UNI EN 15242:2008 - Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni

La UNI EN 15242 definisce i metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, considerando in modo integrato ventilazione meccanica, ventilazione naturale e infiltrazioni attraverso l'involucro edilizio. La norma si colloca nel quadro europeo di valutazione della prestazione energetica degli edifici, in quanto i flussi d'aria di rinnovo influenzano direttamente il bilancio termico della zona e i carichi energetici per riscaldamento e raffrescamento (UNI EN 15242 2008). Dal punto di vista metodologico, il calcolo delle portate è fondato sull'analisi delle differenze di pressione che determinano il moto dell'aria attraverso aperture e discontinuità dell'involucro. Le principali componenti considerate sono:

- effetto vento, funzione della velocità e della direzione del vento esterno;
- effetto camino (stack effect), dovuto alla differenza di densità tra aria interna ed esterna;
- azione dei sistemi meccanici, in caso di ventilazione forzata.

Il modello si basa sulla relazione generale di flusso attraverso un componente dell'involucro:

$$q_{v,comp} = f_{comp}(\Delta p_{comp})$$

Per perdite (fessure dell'involucro):

$$q_{v,leak} = C_{leak} \cdot \text{sign}(\Delta p) \cdot |\Delta p|^{0,667}$$

Per dispositivi di ingresso dell'aria:

$$q_{v,inlet} = C_{inlet} \cdot \text{sign}(\Delta p) \cdot |\Delta p|^{0,5}$$

dove  $\Delta p$  è la differenza di pressione tra interno ed esterno e l'esponente  $n$  assume valori tipici pari a 0,67 per infiltrazioni e 0,5 per aperture.

La differenza di pressione per ciascun componente dell'involucro è calcolata come:

$$\Delta p_{comp} = P_{ext,comp} - P_{int,comp}$$

con:

$$P_{ext,comp} = \rho_{air,ref} \left( 0,5 C_{p,comp} V_{site}^2 - h_{comp} g \frac{T_{e,ref}}{T_e} \right)$$

$$P_{int,comp} = irp - \rho_{air,ref} h_{comp} g \frac{T_{ref}}{T_i}$$

Il bilancio complessivo dei flussi d'aria della zona è ottenuto risolvendo:

$$q_{v,sup} + q_{v,exh} + \sum q_{v,comp} + q_{v,passiveduct} + q_{v,comb} = 0$$

dove l'incognita è la pressione interna di riferimento  $irp$ .  
Nel metodo diretto, la portata dovuta all'effetto camino è stimata come:

$$q_{v,stack} = 0,0146 Q_{4Pa} (h_{stack} |\theta_e - \theta_i|)^{0,667}$$

con  $h_{stack}$  è il 70% dell'altezza della zona  $H_z$   
mentre il contributo del vento è:

$$q_{v,wind} = 0,0769 Q_{4Pa} (dcp V_{site}^2)^{0,667}$$

La portata combinata è:

$$q_{v,sw} = \max(q_{v,stack}, q_{v,wind}) + 0,14 \frac{q_{v,stack} \cdot q_{v,wind}}{Q_{4Pa}}$$

e la portata infiltrata finale:

$$q_{v,inf} = \max(0; -q_{v,diff}) + q_{v,sw}$$

con :

$$q_{v,diff} = q_{v-supply} + q_{v-extr} + q_{v-comb}$$

Il modello consente inoltre la determinazione del coefficiente di perdita dell'involucro a partire dalla portata a una pressione di riferimento:

$$C_{leak} = \frac{q_{v,\Delta p}}{(\Delta p)^n}$$

oppure, a partire dal valore  $n_{50}$ :

$$C_{leak} = 0,278 n_{50} \frac{Vol}{50^n}$$

Infine, per l'aerazione tramite apertura delle finestre, il flusso è espresso come:

$$q_{v,airing} = 3,6 \times 500 A_{ow} V^{0,5}$$

con:

$$V = C_t + C_w V_{met}^2 + C_{st} H_{window} |\theta_i - \theta_e|$$

Tali relazioni permettono di integrare nel bilancio energetico le por-

tate effettive di infiltrazione e ventilazione naturale, quantificando l'impatto dei parametri climatici (velocità del vento, temperatura esterna) e delle caratteristiche dell'involucro sulla prestazione energetica dell'edificio e sulla qualità dell'aria interna.

Il flusso volumetrico attraverso un'apertura può essere espresso, in forma generale, come:

$$q_v = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

dove:

$q_v$  è la portata volumetrica [m<sup>3</sup>/s],

$C_d$  è il coefficiente di scarico dell'apertura [-],

$A$  è l'area efficace dell'apertura [m<sup>2</sup>],

$\Delta p$  è la differenza di pressione tra interno ed esterno [Pa],

$\rho$  è la densità dell'aria [kg/m<sup>3</sup>]

La differenza di pressione totale è data dalla combinazione dei contributi dovuti al vento e al gradiente termico:

$$\Delta p = \Delta p_{vento} + \Delta p_{stack}$$

con:

$$\Delta p_{vento} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_p$$

$$\Delta p_{stack} = \rho g H \left( \frac{T_i - T_e}{T_i} \right)$$

dove:

$v$  è la velocità del vento [m/s],

$C_p$  è il coefficiente di pressione superficiale [-],

$g$  è l'accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>],

$H$  è la differenza di quota tra le aperture [m],

$T_i$ ,  $T_e$  sono le temperature assolute interna ed esterna [K].

Per le infiltrazioni attraverso l'involucro, la norma utilizza modelli basati sulla permeabilità all'aria dell'edificio, generalmente espressa tramite relazioni del tipo:

$$q_v = C \cdot (\Delta p)^n$$

dove  $C$  è il coefficiente di permeabilità e  $n$  l'esponente di flusso (tipicamente compreso tra 0,6 e 0,7).

Le portate così determinate vengono successivamente integrate nel bilancio energetico della zona termica mediante il coefficiente di trasferimento termico per ventilazione:

$$H_{ve} = \rho \cdot c_{air} \cdot q_v$$



influenzando direttamente i carichi sensibili e, in presenza di differenze di contenuto di umidità, anche i carichi latenti.

#### 1.7.4 La serie UNI 10349: dati climatici di riferimento per la valutazione termo-energetica degli edifici

La norma UNI 10349 è articolata in tre parti e costituisce il riferimento nazionale per la definizione dei dati climatici a supporto delle valutazioni termo-energetiche degli edifici. La nuova versione aggiorna i dati climatici contenuti nella versione precedente (UNI 10349:1994) (UNI 10349 2016).

La UNI 10349-1:2016 mette a disposizione le medie mensili dei principali parametri climatici per le località italiane, indispensabili per il calcolo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento. Tra i dati forniti figurano la temperatura media dell'aria esterna, la pressione atmosferica, la velocità media del vento, il gradiente verticale di temperatura e l'irradiazione solare mensile su piano orizzontale, distinta nelle componenti diretta e diffusa. La norma definisce inoltre le procedure per la scomposizione dell'irradiazione globale e per la determinazione dell'irradiazione su superfici inclinate e orientate, mediante modello di cielo isotropo e, in forma informativa, tramite modello di Perez. Tali strumenti risultano essenziali per la stima degli apporti solari passivi e per l'analisi del comportamento estivo dell'involucro (UNI 10349-1 2016).

La UNI/TR 10349-2:2016 integra tali informazioni fornendo i dati climatici di progetto, rappresentativi delle condizioni limite da utilizzare nel dimensionamento degli impianti di climatizzazione e nelle verifiche di surriscaldamento. Sono definite, per ciascuna località, la temperatura esterna di progetto invernale e la temperatura estiva massima giornaliera, con relativa distribuzione oraria ottenuta tramite fattori di ripartizione temporale. Sono inoltre riportati i valori di irradianza solare estiva massima su superfici orizzontali e verticali, insieme ai criteri di interpolazione in funzione della latitudine e di correzione rispetto all'altitudine. Questi parametri consentono di costruire scenari climatici coerenti con il contesto geografico e di condurre simulazioni energetiche in condizioni critiche (UNI/TR 10349-2 2016).

La UNI 10349-3 completa il quadro introducendo le differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) e ulteriori indicatori sintetici utili alla classificazione climatica del territorio e a valutazioni comparative tra diversi ambiti geografici (UNI 10349-3 2016).

Nel complesso, la norma fornisce il set di dati climatici convenzionali necessario per la progettazione e la verifica delle prestazioni

energetiche e termo-igrometriche degli edifici, nonché per il corretto dimensionamento degli impianti di climatizzazione estiva e invernale a essi asserviti.

1.7.4.1 UNI 10349-1 UNI 10349-1:2016 - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata

I metodi di calcolo dell'irraggiamento solare presentati nella UNI 10349-1:2016 costituiscono un elemento fondamentale per la quantificazione dei guadagni solari nei modelli energetici dell'edificio. Le grandezze solari ottenute attraverso la scomposizione dell'irradianza globale orizzontale in componenti diretta e diffusa e la determinazione dell'irradianza su superfici inclinate diventano infatti input indispensabili per il bilancio energetico orario definito nella UNI EN ISO 52016-1:2018.

La determinazione dell'irradianza solare incidente sulle superfici opache e trasparenti dell'involucro edilizio è stata condotta in conformità all'Appendice A della UNI 10349-1, che definisce il metodo per la scomposizione dell'irradianza globale orizzontale nelle componenti diretta e diffusa e per il calcolo dell'irradianza su superfici comunque inclinate e orientate.

L'irradianza solare extra-atmosferica normale  $G_0$  è funzione del giorno dell'anno ed è espressa come:

$$G_0 = G [a_0 + a_1 \cos(\Omega) + a_2 \sin(\Omega) + a_3 \cos(2\Omega) + a_4 \sin(2\Omega)]$$

con angolo orbitale:

$$\Omega = 2\pi \frac{n-1}{365}$$

e  $G=1367\text{W/m}^2$ . L'irradianza extra-atmosferica sul piano orizzontale risulta:

$$I_{h0} = G_0 \sin(\alpha)$$

dove  $\alpha$  è l'altezza solare.

Il tempo solare vero è ottenuto tramite l'equazione del tempo:

$$Et = \frac{24}{2\pi} [a_1 + a_2 \cos(\Omega) + a_3 \sin(\Omega) + a_4 \cos(2\Omega) + a_5 \sin(2\Omega)]$$

$$t_{sa} = t_s + Et + \frac{\psi - 15^\circ}{15^\circ}$$

La declinazione solare  $\delta$  è calcolata come:

$$\delta = \frac{360^\circ}{2\pi} [a_0 + a_1 \cos(\Omega) + a_2 \sin(\Omega) + a_3 \cos(2\Omega) + a_4 \sin(2\Omega) + a_5 \cos(3\Omega) + a_6 \sin(3\Omega)]$$

mentre l'angolo orario è:

$$\omega = 15^\circ (t_{sa} - 12)$$

L'altezza solare è determinata da:

$$\sin(\alpha) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta)$$

Per una superficie inclinata di angolo  $\beta$  e azimut  $\gamma$ , l'angolo di incidenza  $\vartheta$  tra i raggi solari e la normale alla superficie è:

$$\cos(\vartheta) = \sin(\alpha) \cos(\beta) + \cos(\alpha) \cos(\gamma_s - \gamma) \sin(\beta)$$

La ripartizione dell'irradianza globale orizzontale  $I_h$  nelle componenti diretta e diffusa avviene tramite l'indice di soleggiamento:

$$K_t = \frac{I_h}{I_{h0}}$$

La frazione diffusa è:

$$\frac{I_{dh}}{I_h} = \frac{1}{1 + e^{\alpha - \beta K_t}}$$

e la componente diretta:

$$I_{bh} = I_h - I_{dh}$$

L'irradianza totale su superficie inclinata è:

$$I_i = I_{i,b} + I_{i,d}$$

La componente diretta è:

$$I_{i,b} = I_{bh} \cdot R_b \quad \text{con} \quad R_b = \frac{\cos(\vartheta)}{\sin(\alpha)}$$

La componente diffusa, assumendo modello di cielo isotropo, è:

$$I_{i,d} = I_{dh} \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + I_h \rho \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

dove  $\rho$  rappresenta la riflettanza del terreno.

Per applicazioni che richiedono una modellazione anisotropa della radiazione diffusa, l'Appendice B introduce il modello di Perez, nel quale:

$$I_{i,d,sky} = I_{dh} \left[ (1 - F_1) \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin(\beta) \right]$$

con:

$$a = \max[0, \cos(\vartheta)], \quad b = \max[0, 0.872, \cos(\vartheta_z)]$$

Tale procedura consente di determinare in modo coerente con il quadro normativo nazionale l'irradianza incidente su ciascuna superficie dell'involucro, costituendo l'input fondamentale per il calcolo dei guadagni solari nel bilancio energetico dell'edificio e per la valutazione delle condizioni di surriscaldamento estivo.

1.7.4.2 UNI/TR 10349-2:2016 - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto

La norma definisce i parametri climatici di progetto per il dimensionamento degli impianti di climatizzazione e per la valutazione delle condizioni estive critiche. In particolare, la distribuzione oraria della temperatura estiva massima è ottenuta a partire dalla temperatura massima giornaliera mediante la relazione:

$$\theta_t = \theta_{max} - F(t) \Delta\theta_{max}$$

dove:

$\theta_t$  è la temperatura oraria dell'aria esterna;

$\theta_{max}$  è la temperatura massima giornaliera dell'aria esterna;

$F(t)$  è il fattore di distribuzione oraria;

$\Delta\theta_{max}$  è l'escursione termica giornaliera.

Qualora la località di interesse presenti un'altitudine differente rispetto a quella di riferimento, la temperatura massima viene corretta mediante il gradiente verticale di temperatura:

$$\theta_{max} = \theta_{max,r} - (z - z_r) d$$

dove:

$\theta_{max,r}$  è la temperatura massima della località di riferimento;

$z$  è l'altitudine della località considerata;

$z_r$  è l'altitudine della località di riferimento;

$d$  è il gradiente verticale di temperatura.

Per la determinazione dell'irradianza solare estiva massima su superfici verticali orientate, la norma prevede l'interpolazione lineare in funzione della latitudine:

$$I_T(\varphi) = I_T(\varphi_{r1}) + \frac{I_T(\varphi_{r2}) - I_T(\varphi_{r1})}{\varphi_{r2} - \varphi_{r1}} (\varphi - \varphi_{r1})$$

dove:

$I_T(\varphi)$  è l'irradianza massima per la latitudine della località in esame;

$\varphi$  è la latitudine della località;

$\varphi r1, \varphi r2$  sono le latitudini di riferimento immediatamente superiore e inferiore;

$IT(\varphi r1), IT(\varphi r2)$  sono i valori tabulati corrispondenti.

Queste relazioni consentono di costruire il profilo orario della temperatura esterna estiva di progetto e di determinare i valori di irradianza massima coerenti con la posizione geografica del sito, garantendo l'utilizzo di condizioni climatiche limite rappresentative per il dimensionamento impiantistico e per le verifiche di surriscaldamento.

1.7.4.3 UNI 10349-3:2016 - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici

La UNI 10349-3:2016 completa il quadro metodologico della serie UNI 10349 fornendo gli strumenti per la determinazione degli indici climatici sintetici utili alla caratterizzazione del territorio nazionale. Come emerge dalle sezioni dedicate ai gradi giorno di raffrescamento, ai grammi di umidità massica giorno nel periodo di raffrescamento e alla radiazione solare globale cumulata nel periodo di raffrescamento, la norma definisce criteri di calcolo basati su differenze cumulate orarie rispetto a valori base convenzionali e su intervalli temporali di riferimento coerenti con la stagione estiva. Tali indicatori consentono di descrivere in forma sintetica l'intensità e la durata delle sollecitazioni termo-igrometriche estive e costituiscono un supporto metodologico per confronti climatici tra località, per la zonizzazione estiva del territorio e per valutazioni preliminari del fabbisogno energetico per la climatizzazione.

Per il periodo di raffrescamento, la norma definisce le differenze orarie di temperatura rispetto a una temperatura base estiva  $\theta_{b,C}$ .

La differenza oraria è calcolata come:

$$\Delta\theta_{h,C}(\theta_{b,C}) = (\theta_{e,h} - \theta_{b,C}) \quad \text{quando } \theta_{e,h} > \theta_{b,C}$$

$$\Delta\theta_{h,C}(\theta_{b,C}) = 0 \quad \text{quando } \theta_{e,h} \leq \theta_{b,C}$$

Le differenze orarie cumulate nel periodo di calcolo, di durata  $n$  ore, sono determinate mediante:

$$\sum_h \theta_{h,C}(\theta_{b,C}) = \sum_{h=1}^n \Delta\theta_{h,C}(\theta_{b,C})$$

I valori così ottenuti possono essere espressi in gradi giorno di raffrescamento dividendo la sommatoria per 24:

$$\theta_{GG,C}(\theta_{b,C}) = \frac{\sum_h \theta_{h,C}(\theta_{b,C})}{24}$$

La norma specifica inoltre l'intervallo convenzionale di calcolo per il raffrescamento (15 aprile – 14 ottobre) e le temperature base di riferimento riportate nei prospetti normativi.

#### 1.7.5 UNI/TS 13370:2018 - Prestazione termica degli edifici – Trasferimento di calore attraverso il terreno – Metodi di calcolo

La UNI EN ISO 13370:2018 definisce i metodi di calcolo per la determinazione dei coefficienti di trasmissione termica e dei flussi di calore attraverso gli elementi edilizi in contatto con il terreno. La norma si inserisce nel quadro delle norme EPB (Energy Performance of Buildings) ed è strutturata secondo l'impostazione modulare della ISO 52000-1 (modulo M5-5). Essa sostituisce la precedente UNI EN ISO 13370:2008, introducendo un allineamento metodologico con il nuovo impianto normativo europeo sulla prestazione energetica degli edifici. Il trasferimento di calore attraverso il terreno presenta caratteristiche differenti rispetto a quello verso l'aria esterna. Il suolo, infatti, è un mezzo dotato di elevata inerzia termica e di proprietà termo-fisiche proprie (conducibilità e capacità termica volumica), che determinano un comportamento tridimensionale del flusso e una significativa attenuazione e sfasamento delle variazioni stagionali di temperatura (UNI EN ISO 13370 s.d.).

Per questo motivo, la norma non si limita alla valutazione in regime stazionario, ma introduce anche una componente periodica che consente di considerare l'andamento annuale delle temperature interne ed esterne. La norma si applica agli elementi opachi dell'involucro edilizio posti al di sotto del piano orizzontale delimitato dal perimetro esterno dell'edificio, in particolare:

- solai controterra (slab-on-ground floors);
- solai sospesi sopra intercapedini ventilate;
- piani interrati riscaldati;
- piani interrati non riscaldati;
- pareti controterra.

La metodologia distingue la parte stazionaria, legata al flusso medio annuo, dalla parte periodica, correlata all'inerzia del terreno e alla profondità di penetrazione dell'onda termica. Il coefficiente di dispersione verso il terreno, indicato con  $H_g$ , è espresso come combi-

nazione del contributo superficiale e di quello lineare perimetrale:

$$H_g = A \cdot U + P \cdot \psi_{wf}$$

dove A è l'area del pavimento, U la trasmittanza termica del solaio controterra comprensiva dell'effetto del terreno, PPP il perimetro esposto e  $\psi_{wf}$  la trasmittanza lineica del nodo parete-pavimento. Tale relazione evidenzia come le dispersioni verso il suolo dipendano non solo dalla stratigrafia del solaio, ma anche dalla geometria dell'edificio e dalla presenza di ponti termici perimetrali.

#### **Trasmittanza termica equivalente del solaio controterra**

Per i solai controterra, la norma fornisce la procedura per determinare la trasmittanza termica equivalente  $U_g$ , che tiene conto della presenza del terreno.

La forma generale è:

$$U_g = \frac{1}{R_f + R_g}$$

dove:

$R_f$  = resistenza termica della struttura del pavimento;

$R_g$  = resistenza termica equivalente del terreno.

La resistenza del terreno dipende da:

conducibilità  $\lambda_g$ ;

dimensione caratteristica  $B'$ ;

profondità della fondazione;

presenza di isolamento perimetrale.

Per configurazioni semplificate (solaio omogeneo controterra), la norma introduce il concetto di spessore equivalente del terreno, che permette di ricondurre il problema tridimensionale a uno unidimensionale equivalente.

Un aspetto centrale introdotto dalla norma è la "dimensione caratteristica" del pavimento, definita come:

$$B = \frac{A}{0,5 \cdot P}$$

Questa grandezza consente di tenere conto della tridimensionalità del flusso nel terreno e mette in relazione la superficie disperdente con il suo perimetro. In edifici di grande estensione o con pianta compatta, il valore di B aumenta, riducendo l'incidenza relativa delle dispersioni perimetrali; al contrario, edifici con sviluppo articolato presentano un contributo maggiore dei flussi ai bordi.

### Spessore equivalente

La norma introduce inoltre il concetto di “spessore equivalente” del terreno, attraverso il quale la resistenza termica della stratigrafia del solaio viene ricondotta a uno spessore virtuale di suolo avente la stessa resistenza complessiva.

$$d_f = d_{w,e} + \lambda_g \cdot (R_{si} + R_f + R_{se})$$

Questa espressione:

Traduce la stratigrafia del solaio in uno “spessore equivalente di terreno”

Permette di usare le formule semplificate per U

### Calcolo della trasmittanza del solaio su terreno

Caso pavimento poco isolato ( $df < B$ ):

$$U_{fg,sog} = \frac{2 \cdot \lambda_g}{\pi \cdot B + d_f} \ln \left( \frac{\pi \cdot B}{d_f} + 1 \right)$$

Caso pavimento ben isolato ( $df \geq B$ ):

$$U_{fg,sog} = \frac{\lambda_g}{0,457 \cdot B + d_f}$$

oppure forma alternativa:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_f + R_{se} + \frac{d_{w,e}}{\lambda_g} + R_{g,eff}}$$

con:

$$R_{g,eff} = \frac{0,457 \cdot B}{\lambda_g}$$

Tale approccio semplifica l'espressione della trasmittanza e permette di distinguere tra pavimenti poco isolati e pavimenti ben isolati, per i quali vengono fornite formulazioni differenti. In ogni caso, la trasmittanza del solaio controterra risulta funzione della conducibilità termica del terreno  $\lambda_g$ , della resistenza termica del solaio e della dimensione caratteristica B.

Nel contesto della valutazione energetica degli edifici non residenziali, la UNI EN ISO 13370 assume un ruolo rilevante poiché le superfici controterra possono rappresentare una quota significativa dell'involucro disperdente. Le dispersioni verso il suolo influenzano direttamente il fabbisogno di energia per il riscaldamento e, indirettamente, il comportamento estivo dell'edificio, in virtù dell'inerzia termica del terreno. Pertanto, la corretta applicazione di questa norma è essenziale per una stima accurata del bilancio energetico e per l'integrazione coerente con le procedure di calcolo previste dalla UNI EN ISO 52016 e dalla serie UNI EN 16798.



### 1.7.6 UNI/TS 11300 - Valutazione della prestazione energetica degli edifici

Nel contesto normativo nazionale, la valutazione della prestazione energetica degli edifici è regolata da un sistema articolato di norme tecniche che trova il proprio riferimento principale nella serie UNI/TS 11300, adottata per la determinazione dei fabbisogni energetici e dell'energia primaria.

In particolare, la UNI/TS 11300-1<sup>19</sup> definisce il metodo di calcolo del fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione invernale ed estiva, considerando i carichi dovuti alle dispersioni, agli apporti solari e interni e alle condizioni climatiche di riferimento (UNI/TS 11300-1 2014). La norma consente l'applicazione a diverse tipologie di valutazione energetica, design rating, asset rating e tailored rating<sup>20</sup>, distinguendo chiaramente tra condizioni standardizzate e condizioni climatiche e d'uso reali. Dal punto di vista metodologico, il fabbisogno energetico è determinato attraverso il bilancio tra scambi termici per trasmissione e ventilazione, apporti termici interni e apporti solari, tenendo conto della suddivisione dell'edificio in zone termiche caratterizzate da differenti condizioni di utilizzo e regolazione. Integra inoltre la valutazione dei parametri dinamici dell'involucro, quali capacità termica interna, attenuazione e sfasamento dell'onda termica, riconoscendo il ruolo di tali grandezze nella determinazione dei carichi estivi e nel controllo del rischio di surriscaldamento.

Con riferimento alla climatizzazione estiva, la UNI/TS 11300 stabilisce condizioni interne di progetto uniformi per la valutazione dei fabbisogni energetici. In particolare, per tutte le categorie di edifici, ad eccezione delle categorie E.6(1) ed E.6(2), è assunta una temperatura interna costante pari a 26 °C, mentre per tutte le categorie edilizie è considerata un'umidità relativa interna pari al 50%.

La UNI/TS 11300-2 disciplina il calcolo dell'energia primaria e dei rendimenti dei sistemi di generazione, distribuzione ed emissione per la climatizzazione, l'acqua calda sanitaria, la ventilazione e, per gli edifici non residenziali, l'illuminazione (UNI/TS 11300-2 2019).

La UNI/TS 11300-3 è specificamente dedicata alla climatizzazione estiva e stabilisce i criteri per la determinazione del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento, includendo il contributo delle macchine frigorifere elettriche e ad assorbimento, e rappresenta il riferimento normativo per la valutazione dei carichi estivi e del comportamento dell'edificio in condizioni di surriscaldamento (UNI/TS 11300-3 2010).

19. La specifica tecnica recepisce e declina a livello nazionale la UNI EN ISO 13790:2008, adottando il metodo di calcolo mensile per la valutazione dei fabbisogni energetici per riscaldamento ( $Q_{H,nd}$ ) e raffrescamento ( $Q_{C,nd}$ ), nonché per i processi di umidificazione e deumidificazione.

20. *design rating*, per la valutazione progettuale;

*asset rating*, per la valutazione standardizzata energetica di un edificio;

*tailored rating*, per condizioni climatiche e d'uso specifiche.

### 1.7.7 UNI EN ISO 13790:2008 - Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento

La UNI EN ISO 13790 definisce il metodo di calcolo del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, costituendo il riferimento centrale per la valutazione della prestazione energetica dell'involucro edilizio in regime stazionario o semi-dinamico. Il principio alla base del metodo è il bilancio energetico della zona termica, espresso come differenza tra le dispersioni termiche verso l'esterno e gli apporti termici interni e solari (UNI EN ISO 13790 2008).

La norma propone tre approcci alternativi di calcolo:

- metodo mensile (quasi-stazionario);
- metodo stagionale;
- metodo orario semplificato;
- simulazione dinamica (richiamata come metodo di riferimento avanzato).

Nel contesto degli edifici non residenziali oggetto della presente tesi, il metodo mensile e quello orario semplificato assumono particolare rilevanza, poiché consentono di considerare esplicitamente:

- le dispersioni per trasmissione e ventilazione;
- gli apporti solari e gli apporti interni;
- l'effetto dell'intermittenza di funzionamento;
- l'interazione tra edificio e impianto.

#### Fabbisogno di energia termica

Nel metodo mensile, il fabbisogno netto per il riscaldamento è calcolato come:

$$Q_{H,nd} = Q_{ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn}$$

mentre per il raffrescamento:

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,gn} \cdot Q_{ht}$$

Il fattore  $\eta_{gn}$  è il fattore di utilizzazione degli apporti, che tiene conto della capacità dell'edificio di sfruttare gli apporti termici disponibili. Esso dipende dal parametro adimensionale:

$$\gamma = \frac{Q_{gn}}{Q_{ht}}$$

e dalla costante di tempo dell'edificio:

$$\tau = \frac{C_m}{H}$$

dove:

$C_m$  è la capacità termica interna dell'edificio;

H è il coefficiente globale di scambio.

La costante di tempo rappresenta l'inerzia termica dell'edificio e influenza direttamente la capacità di accumulo e rilascio del calore. Il fabbisogno annuale è ottenuto come somma dei contributi mensili:

$$Q_{H,nd,an} = \sum_i Q_{H,nd,i} \quad Q_{C,nd,an} = \sum_i Q_{C,nd,i}$$

### 1.7.8 UNI EN 12792:2005 - Ventilazione degli edifici - Simboli, terminologia e simboli grafici

La UNI EN 12792:2005 costituisce una norma di riferimento per la definizione della terminologia tecnica nel settore della ventilazione degli edifici. Il suo obiettivo principale è fornire un lessico univoco e armonizzato a livello europeo, necessario per garantire coerenza interpretativa tra norme di progettazione, calcolo e verifica delle prestazioni dei sistemi di ventilazione e trattamento dell'aria (UNI EN 12792 2005).

La norma non introduce procedure di calcolo o requisiti prestazionali, ma stabilisce le definizioni dei termini utilizzati nelle normative relative ai sistemi di ventilazione meccanica e naturale, ai componenti impiantistici e ai parametri di qualità dell'aria interna. Essa rappresenta quindi un documento di supporto trasversale, funzionale alla corretta applicazione delle norme tecniche più propriamente operative.

Tra i concetti chiave disciplinati rientrano:

- ventilazione come processo di immissione e/o estrazione controllata dell'aria in un ambiente confinato;
- aria esterna, aria di ripresa, aria di espulsione, aria di rinnovo, in relazione ai percorsi dell'aria nei sistemi di trattamento;
- portata d'aria (volumetrica o massica) come grandezza di riferimento per la valutazione delle prestazioni dei sistemi;
- distinzione tra ventilazione naturale, ibrida e meccanica;
- definizione dei principali componenti impiantistici (unità di trattamento aria, ventilatori, condotti, terminali).

L'importanza della UNI EN 12792 nel contesto della presente ricerca risiede nel suo ruolo di base terminologica per le norme successive in materia di ventilazione e qualità dell'aria interna, tra cui la serie EN 13779 (oggi sostituita dalla EN 16798) e i documenti della serie EPB. In particolare, nei sistemi di ventilazione naturale e nei modelli di calcolo delle portate di rinnovo, la chiarezza terminologica risulta essenziale per distinguere tra flussi d'aria intenzionali

e infiltrazioni non controllate, nonché per interpretare correttamente le grandezze utilizzate nelle procedure di dimensionamento e verifica. Nel quadro della tesi, la UNI EN 12792 assume pertanto una funzione preliminare e sistematica: essa garantisce la coerenza concettuale delle definizioni relative ai flussi di ventilazione e ai parametri dell'aria interna, costituendo la base lessicale su cui si innestano le successive norme di carattere prestazionale e metodologico.

## 1.8 Quadro degli strumenti di valutazione della sostenibilità degli edifici di nuova costruzione in ambito mediterraneo: protocollo LEED, BREEAM ed ITACA

L'approfondita analisi dei numerosi protocolli attualmente in uso, sia a livello nazionale che internazionale, dedicati alla valutazione della sostenibilità ambientale nel settore edilizio, ha consentito di individuare due dei sistemi di certificazione più diffusi e autorevoli nel panorama globale: LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) e BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method). Questi protocolli si sono affermati come riferimenti consolidati per la promozione di pratiche costruttive responsabili, innovative ed energeticamente efficienti. Nel contesto italiano, accanto a questi strumenti di respiro internazionale, assume un ruolo di rilievo anche il protocollo ITACA, ampiamente riconosciuto e adottato. Si tratta di un sistema di valutazione tecnico-normativo che permette di misurare il livello di sostenibilità energetico-ambientale degli edifici, offrendo un supporto concreto alle amministrazioni pubbliche e ai professionisti del settore nella promozione di un'edilizia più consapevole e orientata alla qualità ambientale.

I protocolli di sostenibilità ambientale si configurano come strumenti metodologici fondati su un insieme strutturato di pratiche progettuali virtuose, il cui obiettivo primario è la riduzione dell'impatto ambientale degli edifici e il miglioramento del comfort abitativo, sia durante le fasi di cantiere sia lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio. Tali pratiche vengono integrate all'interno di un sistema di valutazione che prevede l'attribuzione di punteggi e pesi specifici a ciascun criterio, in funzione delle prestazioni effettivamente conseguite. Al termine del processo, il protocollo restituisce una classificazione (rating) che quantifica il livello di sostenibilità raggiunto dall'intervento edilizio. È importante sottolineare che tutti i sistemi di certificazione ambientale considerati affrontano anche la questione dell'efficienza energetica in relazione ai sistemi di raffrescamento, in particolare negli edifici di nuova costruzione. Tuttavia, ciascun protocollo propone criteri distinti per la valutazione di tali impianti, differenziandosi per approcci metodologici, indicatori prestazionali adottati e modalità di attribuzione del punteggio.

21. Sviluppato dall'organizzazione no-profit US Green Building Council (USGBC), fondato da Rick Fedrizzi nell'aprile del 1993.

Queste differenze riflettono le diverse priorità tecnico-progettuali e i contesti normativi di riferimento, influenzando significativamente le strategie di progettazione sostenibile del comfort termico estivo.

#### 1.8.1 - LEED v4 / v4.1 *Building Design + Construction* (BD+C)

Il protocollo LEED<sup>21</sup> (*Leadership in Energy and Environmental Design*) rappresenta il sistema di classificazione per l'edilizia sostenibile più ampiamente adottato a livello globale. Ideato per adattarsi a praticamente ogni categoria di edificio, questo protocollo fornisce una struttura metodologica chiara e coerente per la progettazione, costruzione e gestione di edifici salubri, energeticamente efficienti ed economicamente vantaggiosi (USGBCU 2022). Il sistema LEED si presta ad essere applicato a un'ampia varietà di ambiti edilizi, includendo edifici di nuova costruzione, interni commerciali, edifici esistenti sottoposti a operazioni di gestione e manutenzione, così come progetti relativi al solo involucro edilizio e alle strutture portanti. Questa versatilità lo rende uno strumento di riferimento per una progettazione consapevole e allineata agli obiettivi globali di decarbonizzazione e benessere ambientale. In questo quadro, lo schema LEED v4/v4.1 BD+C costituisce il riferimento più pertinente per la presente ricerca, poiché consente di valutare in modo prestazionale le scelte progettuali che incidono sui carichi di raffrescamento e sul comfort estivo negli edifici di nuova costruzione e negli interventi "*core & shell*". Esso rappresenta inoltre l'evoluzione più recente del framework LEED per la progettazione e realizzazione di edifici ad alte prestazioni ambientali, integrando prestazioni energetiche, qualità ambientale interna e sostenibilità dei materiali in un unico sistema di valutazione orientato alla misurazione delle performance e alla replicabilità delle soluzioni sostenibili (USGBC 2022, 2025). Lo schema si articola in categorie tematiche, tra cui *Integrative Process*, *Sustainable Sites*, *Water Efficiency*, *Energy & Atmosphere*, *Materials & Resources* e *Indoor Environmental Quality*, che consentono di tradurre obiettivi ambientali generali in crediti misurabili e verificabili lungo l'intero ciclo di progetto e di cantiere (USGBC 2023).

Per una ricerca centrata sul raffrescamento passivo e sul comfort estivo, il contributo più rilevante di LEED v4.1 emerge già nella categoria *Integrative Process*, che impone una analisi preliminare dei carichi energetici e microclimatici nelle fasi di pre-design e schematic design. In particolare, il credito *Integrative Process* richiede lo sviluppo di un Simple Box Energy Model volto a esplorare in modo

anticipato come orientamento, forma, involucro, schermature, ventilazione, massa termica e condizioni di sito influenzino la domanda energetica e il comfort termico (USGBC 2023).

Anche la categoria Sustainable Sites contribuisce in modo indiretto al controllo dei carichi estivi attraverso crediti come Heat Island Reduction e Rainwater Management, che promuovono l'uso di superfici riflettenti, coperture verdi, vegetazione e configurazioni di sito in grado di ridurre l'accumulo di calore e migliorare il microclima locale. Questi interventi, sebbene valutati a scala di sito, incidono sulle condizioni di ingresso dell'aria e sulle temperature esterne, influenzando quindi l'efficacia delle strategie di raffrescamento passivo dell'edificio. Nella categoria *Energy and Atmosphere*, il credito *Optimize Energy Performance* costituisce il principale strumento per valorizzare le strategie passive, in quanto assegna fino a 20 punti sulla base della riduzione dei consumi energetici rispetto a un edificio di riferimento.

Poiché la modellazione energetica richiesta tiene conto dei carichi di raffrescamento, tutte le soluzioni che riducono la domanda di freddo, come ombreggiamento, ventilazione naturale, massa termica, isolamento e controllo solare, contribuiscono direttamente al punteggio. Questo meccanismo rende il raffrescamento passivo una leva quantitativamente rilevante per la certificazione. Parallelamente, la categoria *Indoor Environmental Quality* valuta il comfort termo-igrometrico attraverso il credito Thermal Comfort, che richiede la dimostrazione del rispetto di intervalli di temperatura e benessere coerenti con gli standard di comfort e con l'uso previsto degli spazi (USGBC 2022, 2023). L'integrazione di questo credito con quelli su *Daylight*, *Quality Views* e *Ventilation* favorisce soluzioni architettoniche capaci di migliorare il comfort riducendo la dipendenza da sistemi di raffreddamento attivi.

Nel complesso, LEED v4.1 BD+C adotta un'impostazione prestazionale e integrata: il raffrescamento passivo non è trattato come un ambito autonomo, ma come il risultato della coerenza tra processo progettuale, configurazione climatica dell'edificio e controllo dei carichi energetici. Attraverso l'obbligo di modellazione preliminare, la valutazione quantitativa delle prestazioni e l'attenzione alla resilienza climatica, lo schema crea un quadro nel quale le soluzioni bioclimatiche e microclimatiche risultano strutturalmente incentivate, rendendolo particolarmente compatibile con le esigenze di progettazione sostenibile in clima mediterraneo (USGBC 2023, 2025).

22. Nasce nel 1990 nel Regno Unito ed è stato sviluppato dal BRE (Building Research Establishment), un ente britannico di ricerca nel settore delle costruzioni. L'obiettivo è quello di misurare, confrontare e migliorare le prestazioni ambientali degli edifici, considerando aspetti come energia, materiali, gestione dell'acqua e qualità dell'ambiente interno. BREEAM è stato il primo sistema di certificazione ambientale degli edifici al mondo e ha ispirato la nascita di altri sistemi internazionali come LEED, DGNB e HQE.

### 1.8.2 - BREEAM NC V7 - New Construction Version 7 (Market—UK & Europe)

Il BREEAM<sup>22</sup> (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) è un sistema di valutazione e certificazione della sostenibilità tra i più consolidati a livello internazionale, basato su una struttura "olistica" che mira a misurare e premiare le prestazioni ambientali, sociali ed economiche dell'ambiente costruito lungo il ciclo di vita dell'opera (BRE Global 2021a). Nell'ambito delle nuove costruzioni, lo schema BREEAM New Construction è concepito per accompagnare i progetti "ground-up" dalle fasi iniziali di pianificazione fino al completamento, valutando non solo scelte progettuali e costruttive, ma anche aspetti legati all'uso previsto, alla resilienza di lungo periodo e agli impatti sul contesto naturale e antropico circostante (BRE Global 2025b). In questa logica, la certificazione BREEAM opera come strumento di indirizzo e verifica: articolando il processo in categorie tematiche e crediti, consente di tradurre obiettivi generali (riduzione degli impatti, qualità ambientale, gestione delle risorse, adattamento) in requisiti verificabili e documentabili (BRE Global 2021a, 2021b). In particolare, le sintesi tecniche di Versione 7 evidenziano un impianto per categorie che include, tra le altre, Management, Health and Wellbeing, Energy, Transport, Water, Materials, Waste, Land Use and Ecology e Pollution (Tabella n.-), con temi che spaziano dall'energia e carbonio operativo fino alla durabilità/resilienza, alla gestione dei rischi naturali e alla riduzione dell'"heat island effect" come esito di strategie di sito e progetto (BRE Global 2025a). L'evoluzione più recente dello standard, confluita nella BREEAM New Construction Version 7, enfatizza l'allineamento con le più aggiornate evidenze su energia e carbonio, rafforza l'attenzione a whole life carbon, resilienza/adattamento, biodiversità e selezione dei materiali, e introduce un maggiore raccordo con la EU Taxonomy, anche per favorire la rendicontazione e la comparabilità delle performance (BRE Global 2021b, 2025b). Per una ricerca centrata sul raffrescamento passivo in clima mediterraneo, è rilevante osservare come, già nelle declinazioni tecniche precedenti (che costituiscono la base metodologica su cui si innestano gli aggiornamenti), BREEAM includa crediti esplicitamente orientati a un approccio "passive-first": nel tema Ene 04 – Low carbon design, ad esempio, il protocollo richiede una passive design analysis in fase di Concept Design, finalizzata a identificare e implementare misure capaci di ridurre i carichi complessivi (inclusi quelli di raffrescamento), con una copertura minima che comprende microclima, orientamento, forma, involucro, massa termica, strategia di illumi-



nazione e soprattutto strategia di ventilazione e adattamento al cambiamento climatico. In modo ancora più diretto rispetto al tema del raffrescamento estivo, lo stesso framework prevede la verifica di soluzioni di “free cooling” e la valutazione di strategie quali ventilazione notturna, raffrescamento accoppiato al suolo, ventilazione per dislocamento non associata a sistemi di raffreddamento attivo, raffrescamento evaporativo (diretto/indiretto) e altre soluzioni affini (BRE Global 2018, 2021a). In questa prospettiva, il protocollo BREEAM considera il raffrescamento passivo non come un elemento secondario, ma come parte integrante della valutazione delle prestazioni dell’edificio, in quanto contribuisce simultaneamente alla riduzione della domanda energetica, al miglioramento del comfort termo-igrometrico e alla capacità dell’edificio di adattarsi a condizioni climatiche future. Tale impostazione risulta particolarmente pertinente nei contesti mediterranei, caratterizzati da carichi estivi elevati, nei quali le strategie microclimatiche e passive assumono un ruolo determinante per la sostenibilità e la resilienza del costruito.

### 1.8.3 - Protocollo ITACA

Il Protocollo ITACA<sup>23</sup> (istituto per l’Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale) costituisce il principale sistema nazionale di valutazione della sostenibilità energetica e ambientale degli edifici sviluppato in Italia ed è ampiamente utilizzato a livello nazionale e regionale come riferimento tecnico per misurare le prestazioni degli interventi edilizi (ITACA 2004). Il protocollo nasce con l’obiettivo di fornire uno strumento prestazionale in grado di misurare in modo oggettivo la qualità ambientale ed energetica dell’edificio, superando approcci puramente prescrittivi e favorendo una progettazione orientata alla riduzione dei consumi, al comfort degli utenti e alla compatibilità con il contesto climatico e territoriale. La struttura del Protocollo ITACA si fonda su un sistema multicriteriale articolato in sette Aree di Valutazione, che comprendono qualità ambientale esterna, consumo di risorse, carichi ambientali, qualità dell’ambiente interno, qualità del servizio, qualità della gestione e trasporti. All’interno di questo impianto metodologico, la dimensione energetica e microclimatica è trattata in modo trasversale e integrato, con particolare attenzione al comportamento dell’edificio in relazione alle condizioni climatiche locali. L’efficienza energetica è esplicitamente affrontata nell’Area 2 – Consumo di risorse, che include requisiti specifici relativi all’isolamento termico, ai sistemi solari passivi, alla produzione di acqua calda sanitaria e al consumo di energia elettrica da fonti non rinnovabili.

23. È stato sviluppato nell’ambito di un Gruppo di Lavoro Interregionale coordinato da ITACA con il contributo di Regioni, enti pubblici, università e istituti di ricerca.

li. La presenza di una categoria dedicata ai sistemi solari passivi (2.1.2) colloca in modo formale le strategie bioclimatiche e di raffrescamento passivo all'interno del nucleo energetico del protocollo, riconoscendone il ruolo nella riduzione strutturale dei fabbisogni di climatizzazione. Parallelamente, il comfort termico è oggetto di una valutazione dettagliata nell'Area 4 – Qualità dell'ambiente interno, che include requisiti relativi alla temperatura dell'aria, alla temperatura delle superfici interne e all'inerzia termica dell'edificio. L'inerzia termica (4.3.3), in particolare, rappresenta un indicatore chiave per il controllo delle oscillazioni termiche estive e per la riduzione del rischio di surriscaldamento, configurandosi come uno dei principali parametri attraverso cui il protocollo intercetta le prestazioni dei sistemi passivi.

Nel definire i principi alla base dell'architettura sostenibile, il Protocollo ITACA attribuisce un ruolo centrale all'approccio bioclimatico, esplicitandone obiettivi e modalità operative in relazione al controllo energetico e climatico dell'edificio.

*<<Gli edifici «bioclimatici» sono opere architettoniche in genere caratterizzate dall'utilizzazione di componenti e/o sistemi edilizi che, oltre ad esplicare la loro funzione specifica, sono anche in grado di assolvere funzioni energetiche, ossia di captare, accumulare, conservare e restituire l'energia termica trasportata dai raggi solari. Altro obiettivo dell'architettura bioclimatica è quello di raffrescare naturalmente gli edifici, a mezzo di tecniche di espulsione del calore indesiderato verso dissipatori di calore «ambientali» (aria, cielo, terra e acqua), con l'ausilio di metodi naturali di trasferimento del calore.>> (ITACA 2004)*

Ne deriva una visione nella quale il raffrescamento non è interpretato come una mera funzione impiantistica, ma come il risultato di un insieme coordinato di scelte progettuali che riguardano materiali, orientamento, morfologia, ventilazione, schermature e caratteristiche dell'involucro. Il sistema di punteggio ITACA premia infatti gli edifici capaci di ridurre i carichi termici estivi attraverso soluzioni passive e bioclimatiche, coerentemente con l'obiettivo dichiarato di contenere i consumi energetici al di sotto di soglie prestazionali definite. In questo quadro, il Protocollo ITACA si configura come uno strumento particolarmente adatto al contesto mediterraneo, nel quale la qualità del comfort estivo, il controllo del surriscaldamento e l'efficienza delle strategie passive rappresentano fattori critici per la sostenibilità dell'ambiente costruito. La sua impostazione integrata consente di valutare in modo coerente il contributo delle

soluzioni di raffrescamento passivo alla riduzione dei consumi, al benessere degli utenti e alla resilienza climatica degli edifici.

#### 1.8.4 - Confronto tra i protocolli LEED, BREEAM e ITACA

Il confronto mette in evidenza come, pur condividendo una comune struttura prestazionale e multicriteriale, i tre protocolli differiscano significativamente nel modo in cui interpretano il ruolo del raffrescamento e del comfort estivo. Mentre LEED privilegia una logica di ottimizzazione energetica prevalentemente impiantistica e BREEAM adotta un approccio integrato che valorizza le strategie passive, il Protocollo ITACA si distingue per una concezione esplicitamente bioclimatica, nella quale il controllo del microclima, l'inerzia termica e le soluzioni di raffrescamento naturale costituiscono elementi strutturali della prestazione ambientale dell'edificio, particolarmente rilevanti nei contesti mediterranei.

*Tabella 1.7 Confronto tra i protocolli LEED, BREEAM e ITACA.*

*Fonte: K. Mitrik*

| Ambito di confronto                       | LEED (BD+C)                                                                                                                                     | BREEAM (New Construction V7)                                                                                                         | ITACA                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Scala e ambito di applicazione            | Protocollo internazionale applicabile a edifici di nuova costruzione, ristrutturazioni, interni e involucro edilizio, con adattamenti nazionali | Protocollo internazionale applicato a edifici "ground-up", con schemi specifici per diversi mercati (UK, Europa, International)      | Protocollo nazionale italiano con declinazioni regionali, applicabile a edifici e interventi in contesto climatico e normativo italiano |
| Approccio metodologico                    | Sistema a crediti organizzati in categorie tematiche con livelli di certificazione progressivi                                                  | Sistema multicategoria con pesi e soglie minime, orientato alla valutazione prestazionale lungo il ciclo di vita                     | Sistema multicriteriale basato su aree di valutazione e benchmark prestazionali legati al contesto                                      |
| Ruolo dell'efficienza energetica          | Centrale nella categoria Energy and Atmosphere, con obiettivi di riduzione dei consumi e integrazione delle rinnovabili                         | Centrale nella categoria Energy e nei criteri di carbonio operativo e whole life carbon                                              | Integrata nell'Area "Consumo di risorse", con indicatori su isolamento, sistemi passivi e consumi di energia                            |
| Considerazione del comfort termico        | Inclusa nella categoria Indoor Environmental Quality, con attenzione a temperatura, ventilazione e qualità dell'aria                            | Inclusa nella categoria Health and Wellbeing, che valuta comfort termico e benessere degli occupanti                                 | Esplicitamente valutata nell'Area "Qualità dell'ambiente interno" tramite temperatura dell'aria, superfici e inerzia termica            |
| Trattamento del raffrescamento passivo    | Indiretto: le strategie passive contribuiscono alla riduzione dei fabbisogni energetici ma non sono valutate come categoria autonoma            | Esplicito: attraverso "passive design analysis", free cooling, ventilazione naturale, raffrescamento notturno e strategie climatiche | Esplicito: sistemi solari passivi, inerzia termica, microclima e ventilazione sono criteri formali di valutazione                       |
| Relazione con il microclima e il sito     | Considerata nella progettazione del sito e dell'involucro, ma non come parametro climatico locale esplicito                                     | Integrata tramite analisi microclimatica e strategie di mitigazione (es. isola di calore, ventilazione)                              | Centrale: il clima, il vento, la radiazione e il contesto sono dati di progetto e di valutazione                                        |
| Adattamento ai climi caldi e mediterranei | Possibile tramite progettazione avanzata, ma non specificamente calibrato                                                                       | Forte attenzione a resilienza e adattamento climatico nelle versioni recenti                                                         | Intrinsecamente calibrato al contesto climatico italiano e mediterraneo                                                                 |
| Visione del raffrescamento                | Funzione prevalentemente impiantistica ottimizzata tramite efficienza                                                                           | Funzione integrata tra impianti e strategie passive                                                                                  | Funzione architettonica e bioclimatica prima che impiantistica                                                                          |

## 1.9 Il contesto clima e ambientale del bacino mediterraneo

24. Wladimir Koppen è stato un famoso geografo, botanico e climatologo. Nato in Russia, egli è vissuto prevalentemente in Germania tra il 1846 e il 1940, ed è divenuto famoso per la classificazione dei climi da lui elaborata e proposta nel 1918, perfezionata più volte e che porta il suo stesso nome. La prima versione del sistema fu pubblicata nel 1884, ma la sua forma definitiva, quella che oggi conosciamo come Köppen-Geiger, venne perfezionata insieme al climatologo Rudolf Geiger nel 1936, la cui ultima edizione è del 1961.

*Tabella 1.8 Classificazione dei climi temperati (gruppo C) secondo il sistema Köppen-Geiger, con distinzione tra sottotipi Cf (senza stagione secca), Cs (estate secca) e Cw (inverno secco), e ulteriori articolazioni legate alle temperature del mese più caldo (Ca, Cb). Estratto dal sistema della classificazione climatica di Köppen-Geiger. Fonte: Il raffrescamento passivo degli edifici - II edizione, Grosso, M. 2008.*

### 1.9.1 Il sistema di classificazione climatica di Köppen-Geiger

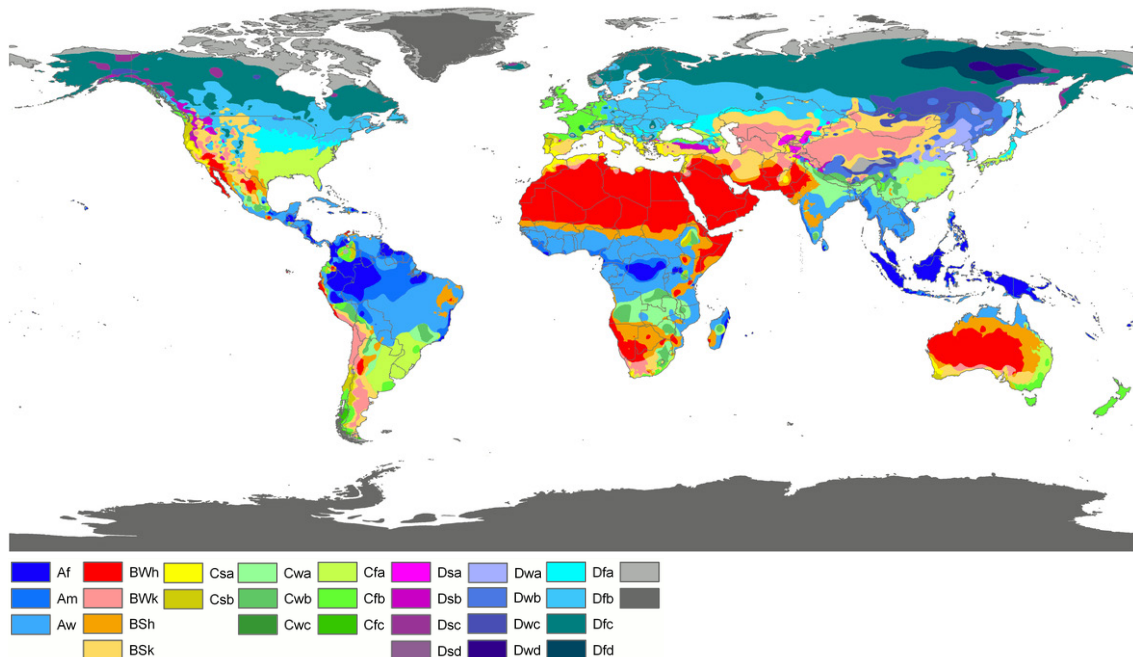
La classificazione climatica di tipo quantitativo più diffusa ad oggi per scopi geografici è quella di Köppen<sup>24</sup> (Figura 1.17). Questo sistema si basa principalmente su un approccio empirico, il che significa che ogni tipo di clima viene definito in base a valori prestabiliti di temperatura e precipitazioni, calcolati in base alle medie annuali o mensili. Nella classificazione non si considerano le cause del clima, come la pressione atmosferica, le correnti di vento, le masse d'aria, i fronti o le perturbazioni. Si limita ad assegnare una determinata località a un sottogruppo climatico basandosi esclusivamente sui dati locali di temperatura e precipitazioni, a condizione che il periodo di osservazione sia sufficientemente lungo per fornire medie attendibili.

Secondo Grosso tale classificazione si basa su particolari valori della temperatura e della piovosità, tenendo presenti le esigenze della vegetazione nella scelta dei limiti tra i vari tipi climatici. Nel sistema di classificazione di Köppen, alla lettera maiuscola corrispondente ad un tipo climatico principale, definito in funzione della tempera-

|   |                                                                                                        |                  |                                                                                                                                                                                          |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C | climi mesotermici umidi (t mese più freddo compresa tra -3° +18°)                                      | Cf               | clima temperato senza stagione secca                                                                                                                                                     |
|   | Ca, set mese più caldo > 22°<br>Cb, set mese più caldo < 22°, ma si hanno oltre quattro mesi con > 10° | Cs <sup>25</sup> | clima temperato con estate secca (il mese meno piovoso cade nella stagione estiva e ha un tot. di precipitazioni < 1/3 di quello del mese invernale più piovoso e, in ogni caso, <30 mm) |
|   |                                                                                                        | Cw               | clima temperato con inverno secco (il mese meno piovoso cade nella stagione invernale e riceve una quantità di precipitazioni < 1/10 di quella del mese più piovoso dell'estate)         |

tura, viene associata un'altra lettera, individuante un sottotipo climatico definito da ulteriori specificazioni delle variazioni stagionali di temperatura e del regime pluviometrico. A tale lettera, indicante la iniziale di una parola tedesca significativa di una particolare condizione climatica (ad esempio, f, che deriva da fehlt = manca, sta a indicare l'assenza di una stagione arida, come s, da sommer = estate, indica che la stagione arida cade nell'estate) è associata una formula che definisce i limiti quantitativi di variazione della temperatura e della piovosità entro cui viene definito il sottotipo climatico corrispondente. Un grande vantaggio di un sistema climatico basato su questi principi è che le aree che corrispondono a ciascun tipo di clima possono essere facilmente identificate su vaste regioni del pianeta. Utilizza cinque lettere maiuscole, dalla A alla E, per indicare cinque gruppi principali di clima e una combinazione di altre lettere per meglio caratterizzarli in sottogruppi sulla base dei valori medi mensili, stagionali e annuali di precipitazione e temperatura. Sebbene il sistema di classificazione climatica di Köppen sia ampiamente riconosciuto per la sua articolazione e ingegnosità, presenta tuttavia alcune limitazioni. Diversi studiosi, tra cui climatologi e botanici, hanno evidenziato – sulla base di osservazioni condotte in diverse aree del mondo – che i valori soglia adottati da Köppen non risultano sempre adeguati a rappresentare in modo accurato la

*Figura 1.17 Carta della classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köppen-Geiger, con distribuzione delle principali zone climatiche globali sulla base di temperatura e precipitazioni medie. Fonte: Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A., The University of Melbourne (dati GHCN).*



transizione tra differenti condizioni climatiche. In risposta a tali incongruenze, sono state proposte modifiche puntuali a tali parametri di classificazione. Inoltre, l'evoluzione climatica attesa nei prossimi decenni, legata all'aumento della temperatura media globale dovuto all'incremento dei gas serra in atmosfera, solleva ulteriori interrogativi sulla validità statica di questi valori limite. Uno degli effetti più significativi di questa tendenza al riscaldamento globale sembra essere lo spostamento progressivo delle fasce climatiche, con implicazioni dirette sulla distribuzione geografica delle specie vegetali e sulle relative zone di crescita (Grosso 2008).

### 1.9.2 Il Clima Mediterraneo

Il clima mediterraneo (Csa, tranne lungo la costa oceanica e il Portogallo, in cui si caratterizza come Csb), tipico del Portogallo centro-meridionale, di tutta la fascia costiera e delle isole del mar Mediterraneo, da Gibilterra a Cipro, della Spagna meridionale interna fino alla costa atlantica sul golfo di Cadice, dell'Appennino centro-meridionale, di tutta la Grecia (Csa) è il meno esteso dei climi temperati. È caratterizzato da estati secche con elevato rischio di siccità ed inverni piovosi con temperature miti; il mare contribuisce a determinare il clima, il quale è temperato caldo, con escursioni termiche giornaliere ed annue modeste (inferiori a 21 °C): infatti, il mare trattiene il calore estivo accumulandolo e rilasciandolo poi durante il periodo invernale. Comprende due sottotipi Csa e Csb, climi temperati delle medie latitudini con estati asciutte calde o molto calde:

- Csa\_Climi mediterranei interni: indica un clima di tipo mediterraneo con estati calde; più precisamente, è il clima in cui il mese più freddo ha temperatura in media superiore a 0°C, con almeno un mese con temperatura media superiore a 22°C e almeno quattro mesi con temperatura media superiore a 10°C, in cui il mese più umido dell'anno ha almeno il triplo delle precipitazioni rispetto al mese più secco dell'estate, e il mese più secco dell'estate deve avere meno di 30 mm di pioggia;
- Csb\_Climi mediterranei costieri: indica un clima di tipo mediterraneo temperato con estati fresche; più precisamente, è il clima in cui il mese più freddo ha temperatura media superiore a 0°C, ma inferiore a 18°C, con almeno un mese con temperatura media superiore a 22°C e almeno quattro mesi con temperatura media superiore a 10°C. In questo tipo di clima, il mese più umido dell'anno ha almeno il triplo delle precipitazioni rispetto al mese più secco dell'estate, e il mese più secco dell'estate deve avere meno di 30 mm di pioggia.

I tipi climatici in cui può essere utile conoscere le tecniche di raf-

Fonte: Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A., *The University of Melbourne* (dati GHCN).



-Csb (clima temperato mediterraneo con estate mite): presente nelle aree costiere del nord-ovest e nelle zone appenniniche e collinari, con estati più fresche e piogge distribuite.

-Cfa (clima temperato umido con estate calda): tipico della Pianura Padana e di parte del Nord-Est, con estati calde e umide e inverni freddi e nebbiosi.

-Dfb / Dfc (clima continentale umido): presente nelle aree alpine, con inverni lunghi e rigidi ed estati brevi e fresche (Beck et al. 2018). Per determinare il fabbisogno termico di una specifica zona climatica d'Italia, il territorio nazionale è stato suddiviso in sei zone climatiche (A, B, C, D, E, F) in base alle temperature medie giornaliere, ai sensi del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412 (DPR 412/1993) (DPR 412/1993 Decreto del Presidente della Repubblica, 1993 ).

Il criterio alla base della zonizzazione è basato sui gradi giorno (DD), che sono la somma estesa a tutti i giorni dell'anno della differenza (solo quella positiva) tra la temperatura ambiente interna (fissata per convenzione a 20 °C) e la temperatura media giornaliera esterna. (Baglivo et al. 2023)

Le sei zone climatiche in Italia secondo il D.P.R. 26 agosto 1993 n. 412.



#### 1.9.4 Situazione attuale: Transizione climatica globale secondo la classificazione Köppen-Geiger

Alla luce dell'evoluzione climatica in corso, l'applicazione statica della classificazione Köppen-Geiger è stata superata da nuovi approcci dinamici capaci di rappresentare le variazioni spaziali e temporali delle zone climatiche. In particolare, lo studio di Beck et al. (2023), pubblicato su Scientific Data, fornisce mappe climatiche aggiornate a 1 km di risoluzione per il periodo 1901–2099, basate su osservazioni storiche e su proiezioni dei modelli CMIP6, con correzione dei bias e aggregazione temporale per rappresentare i cambiamenti nel lungo termine (Beck et al. 2023).

Nel periodo storico (1901–1930), ampie porzioni dell'Europa centrale, del Nord America e dell'Asia settentrionale rientravano nei climi temperati umidi (es. Cfb, Cfa), caratterizzati da estati calde e precipitazioni distribuite tutto l'anno.

Al contrario, le aree tropicali (Af, Am, Aw) e aride (BWh, BWk, BSh) risultavano ben delimitate geograficamente, con un'estensione stabile legata alla latitudine e all'orografia. Le proiezioni per fine XXI secolo (2071–2099, SSP2-4.5), tuttavia, mostrano una netta espansione delle zone aride e semiaride (BWh, BSh), in particolare in Nord Africa, Medio Oriente, Australia e Sud-Ovest degli Stati Uniti. Allo stesso tempo, molte regioni europee e asiatiche passano da climi temperati (C) a climi più secchi e caldi, segnando una tropicalizzazione delle fasce mediterranee (Csa → BSh) e un arretramento dei climi boreali (Dfa, Dfb). In particolare, l'area del bacino del Mediterraneo – inclusa l'Italia – emerge come una delle regioni climatiche più vulnerabili nel panorama globale. Secondo le proiezioni di Beck et al. (2023), entro la fine del XXI secolo, gran parte delle zone attualmente caratterizzate da clima temperato con estate secca (Csa) evolveranno verso condizioni più calde e aride, avvicinandosi alle classi BSh (steppe calde) e BWh (deserti caldi), tipiche delle fasce subtropicali secche.

Questo mutamento non riguarda solo le temperature estive sempre più elevate, ma anche la diminuzione della piovosità annuale e la maggiore concentrazione delle precipitazioni in eventi estremi e discontinui. Nel caso dell'Italia, il cambiamento sarà più marcato nelle regioni centro-meridionali e nelle aree costiere, dove la stagionalità estiva diventerà progressivamente più siccitosa e prolungata, con impatti significativi sia sul patrimonio edilizio esistente che sulle future strategie costruttive.

Questi dati confermano quanto già espresso da altre fonti scientifiche (ESOTC, IPCC, CMCC), ovvero che l'Italia rientra nella fascia

climatica europea a “transizione accelerata”, per cui l’adattamento edilizio dovrà non solo mitigare i picchi termici, ma anche affrontare condizioni di stress idrico e maggiore domanda energetica per il raffrescamento.

Questi cambiamenti climatici regionali hanno impatti significativi sulla progettazione e gestione degli edifici. Il passaggio a climi più caldi e secchi implica una maggiore domanda di raffrescamento e una riduzione della stagionalità termica, rendendo prioritario l’uso di soluzioni bioclimatiche e sistemi passivi in ambito edilizio. La classificazione Köppen-Geiger, in questo senso, costituisce uno strumento utile non solo per descrivere l’evoluzione climatica, ma anche per orientare le politiche di adattamento edilizio e urbano in funzione dei contesti climatici attesi.

Nell’area del Mediterraneo, il cambiamento climatico è già una realtà tangibile e si prevede che nei prossimi decenni comporterà un’intensificazione di fenomeni meteorologici estremi, tra cui ondate di calore sempre più prolungate e torride, e precipitazioni violente spesso associate a tempeste intense, come dimostrano i recenti cicloni mediterranei (medicane). Tali trasformazioni potrebbero rendere necessaria una futura revisione della classificazione climatica dell’intera regione. L’origine di questi mutamenti è da ricondurre prevalentemente alle attività antropiche, in particolare all’uso massiccio di fonti energetiche fossili, responsabili delle emissioni climalteranti e dell’aumento della temperatura media globale (Salata et al., 2022).

Il surriscaldamento interesserà in modo marcato le aree densamente popolate, dove la domanda di energia per garantire condizioni di comfort termico interno tenderà ad aumentare. In tali contesti, la crescente frequenza di ondate di calore sta determinando un incremento significativo dell’adozione di sistemi di climatizzazione estiva, con inevitabili ricadute sul consumo energetico e sulle emissioni. L’adozione di tali standard consente di uniformare i parametri di calcolo e di garantire la confrontabilità dei risultati, facilitando l’analisi energetica e il dimensionamento ottimale degli impianti di climatizzazione. In un contesto mediterraneo soggetto a riscaldamento accelerato, queste prescrizioni tecniche assumono un ruolo strategico per la pianificazione di interventi edilizi e impiantistici mirati alla resilienza climatica e alla riduzione del fabbisogno di raffrescamento.

## 1.10 Conclusioni e riflessioni

Le analisi sviluppate nel presente capitolo consentono di delineare un quadro interpretativo organico nel quale il raffrescamento degli edifici emerge come una delle principali criticità sistemiche della transizione energetica contemporanea. L'attuale livello di consumo globale per la climatizzazione estiva, superiore a 2.000 TWh/anno e associato a emissioni prossime a 1 Gt di CO<sub>2</sub>, non rappresenta un fenomeno contingente, bensì una dinamica strutturale destinata ad accentuarsi nel medio-lungo periodo. Tale crescita è strettamente connessa sia all'aumento delle temperature medie globali, sia all'intensificazione dei processi di urbanizzazione e diffusione del benessere, che determinano un accesso sempre più ampio ai sistemi di climatizzazione. In questo scenario, il raffrescamento si configura come una componente critica del bilancio energetico degli edifici, incidendo in modo significativo sui picchi di domanda elettrica e contribuendo alla vulnerabilità delle infrastrutture energetiche, in particolare durante eventi climatici estremi.

Le proiezioni indicano che, in assenza di interventi strutturali, la domanda globale di elettricità per il raffrescamento potrebbe crescere fino al 40% entro il 2030 e più che raddoppiare entro il 2050, accompagnata da un incremento esponenziale del numero di apparecchi installati, stimato in oltre 5 miliardi di unità.

Una prima considerazione riguarda proprio il carattere intrinsecamente reattivo dell'attuale paradigma del raffrescamento, fondato prevalentemente sull'uso diffuso di sistemi attivi. Questo approccio interviene a valle del problema, compensando il surriscaldamento anziché prevenirlo, e determina un circolo vizioso in cui l'aumento delle temperature esterne alimenta la domanda di raffrescamento, che a sua volta contribuisce all'incremento delle emissioni climateranti e del calore antropico rilasciato nell'ambiente urbano. Tale dinamica è particolarmente evidente nei contesti metropolitani, dove il fenomeno dell'isola di calore urbana amplifica ulteriormente i carichi termici, generando un incremento locale delle temperature che può superare anche i +3/+5 °C rispetto alle aree periurbane.

Queste criticità risultano ancora più accentuate nel contesto del ba-

cino mediterraneo, che si configura come uno degli *hotspot* climatici più vulnerabili ai cambiamenti in atto. Le proiezioni climatiche indicano per quest'area un aumento delle temperature superiore alla media globale, accompagnato da una maggiore frequenza, intensità e durata delle ondate di calore. Entro il 2050, numerose città mediterranee saranno esposte a condizioni climatiche tipiche di regioni attualmente subtropicali, con un conseguente incremento significativo dei gradi giorno di raffrescamento e della domanda energetica associata.

In tale contesto, l'adozione diffusa di sistemi di climatizzazione meccanica presenta ulteriori elementi di criticità. Da un lato, si osserva un aumento consistente dei consumi elettrici estivi, che mette sotto pressione le reti energetiche, spesso già caratterizzate da limiti infrastrutturali e da una forte dipendenza da fonti fossili nei momenti di picco. Dall'altro, il raffrescamento meccanico contribuisce direttamente al riscaldamento dell'ambiente urbano attraverso il rilascio di calore sensibile all'esterno, aggravando il fenomeno dell'isola di calore e riducendo l'efficacia delle strategie di adattamento climatico su scala urbana.

Un ulteriore aspetto critico riguarda la disomogeneità nell'accesso al raffrescamento. Se nei Paesi industrializzati la diffusione dei sistemi di climatizzazione è elevata, nei contesti a più basso reddito, inclusi alcuni ambiti del Mediterraneo meridionale, l'accesso al raffrescamento rimane limitato, esponendo ampie fasce della popolazione a condizioni di discomfort termico e a rischi sanitari crescenti. Si configura pertanto una doppia sfida: da un lato, contenere l'impatto ambientale del raffrescamento nei contesti ad alta diffusione; dall'altro, garantire soluzioni accessibili, sostenibili e a basso consumo energetico nelle aree più vulnerabili.

Alla luce di tali criticità, appare evidente come il paradigma attuale, basato su un incremento progressivo della capacità installata e sull'efficienza dei sistemi attivi, non sia sufficiente né sostenibile nel lungo periodo. Anche in presenza di miglioramenti tecnologici significativi, il rischio di effetto rimbalzo rimane elevato, poiché l'aumento della domanda tende a compensare i guadagni di efficienza. Ne deriva la necessità di un cambiamento strutturale nell'approccio al raffrescamento, orientato alla riduzione preventiva dei carichi termici.

In questa prospettiva, il raffrescamento passivo assume un ruolo centrale come strategia in grado di intervenire a monte del problema, agendo sui meccanismi fisici che regolano gli scambi termici tra edificio e ambiente. L'ottimizzazione dell'involucro edilizio, il controllo degli apporti solari, l'uso dell'inerzia termica, la ventilazione

naturale e l'interazione con dissipatori naturali quali il suolo e la volta celeste consentono di ridurre significativamente il fabbisogno di raffrescamento meccanico, migliorando al contempo il comfort ambientale interno. Tuttavia, anche rispetto al raffrescamento passivo emergono alcune criticità e limiti applicativi che devono essere considerati in una prospettiva scientifica e progettuale rigorosa.

- In primo luogo, l'efficacia delle strategie passive è fortemente dipendente dalle condizioni climatiche locali e può risultare ridotta in scenari caratterizzati da temperature notturne elevate e scarsa escursione termica, sempre più frequenti nel Mediterraneo.
- In secondo luogo, l'integrazione di tali strategie richiede un elevato livello di competenza progettuale e una visione integrata del processo edilizio, ancora non pienamente diffusa nella pratica professionale.

Il quadro delineato mette in evidenza come il raffrescamento rappresenti una delle sfide più rilevanti e complesse per il futuro dell'ambiente costruito, in particolare nel contesto mediterraneo. La transizione verso edifici a basse emissioni richiede un superamento dell'attuale paradigma tecnologico, orientandosi verso una riduzione strutturale della domanda energetica e verso l'integrazione di strategie passive e soluzioni bioclimatiche. In questa prospettiva, il raffrescamento passivo non costituisce una soluzione unica o esaustiva, ma rappresenta un elemento fondamentale di un approccio integrato, capace di coniugare efficienza energetica, resilienza climatica e qualità ambientale.

Le considerazioni sviluppate costituiscono pertanto la base concettuale per gli approfondimenti dei capitoli successivi, nei quali l'attenzione sarà rivolta all'analisi sistematica delle strategie passive e dei dissipatori naturali, con l'obiettivo di valutarne in modo quantitativo il potenziale prestazionale e il contributo concreto alla sostenibilità energetica degli edifici, con particolare riferimento al settore non residenziale e al contesto climatico mediterraneo.

## References

- Ascione, Fabrizio, Rosa Francesca De Masi, Filippo de Rossi, Silvia Ruggiero, e Giuseppe Peter Vanoli. 2016. «Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study». *Applied Energy* 183:938–57. doi:10.1016/j.apenergy.2016.09.027.
- ASviS. 2019. «Verso l'abolizione dei gas serra: 65 Paesi firmano l'Emendamento Kigali». <https://asvis.it/goal12/notizie/1303-3731/verso-labolizione-dei-gas-serra-65-paesi-firmano-lemendamento-kigali->.
- ASviS, e Ivano Manzo. 2022. «Per evitare il disastro l'Ipcc fissa al 2025 il punto di svolta nelle emissioni». <https://asvis.it/notizie/2-12503/per-evitare-il-disastro-lipcc-fissa-al-2025-il-punto-di-svolta-nelle-emissioni>.
- Azzini, Elena. 2025. «Obiettivi PNIEC al 2030: una sfida di tutti per il bene del Paese». <https://agici.it/rassegna-stampa-obiettivi-pniec-al-2030-una-sfida-di-tutti-per-il-bene-del-paese/>.
- Baglivo, Cristina, Paolo Maria Congedo, e Nicola Antonio Malatesta. 2023. «Building Envelope Resilience to Climate Change under Italian Energy Policies». *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 411.
- Beck, Hylke, Niklaus Zimmermann, Tim McVicar, Noemi Vergopolan, Alexis Berg, e Eric Wood. 2018. «Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution». *Scientific Data* 5:180214. doi:10.1038/sdata.2018.214.
- BRE Global. 2018. «BREEAM UK New Construction 2018».
- BRE Global. 2021a. «BREEAM International New Construction Version 6».
- BRE Global. 2021b. «BREEAM New Construction Version 6.1». <https://bregroup.com/news/breeam-news-version-6-1-launched>.
- BRE Global. 2025a. «BREEAM New Construction V7 Resources». <https://breeam.com/breeam-new-constructionv7/downloads>.
- BRE Global. 2025b. «Summary of Changes – BREEAM New Construction Version 7».
- Camera dei deputati. 2021. «Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza». <https://temi.camera.it/leg19/pnrr.html>.
- Camera dei deputati – Servizio Studi. 2025. «Le fonti rinnovabili. Politiche e obiettivi di sviluppo».
- CCC. 2021. «The Clean Cooling Coalition». <https://www.cleancoolingcoalition.eu/about-us/>.
- CCC. 2024. «MID-PROGRAM IMPACT REPORT (2022-2024) Setting a Course for Efficient, Climate-Friendly Cooling for All». <https://www.cleancoolingcollaborative.org/report/clean-cooling-collaborative-mid-program-impact-report/>.
- CCCAC. 2018. «Cooling for all – the 18th Sustainable Development Goal | Climate & Clean Air Coalition». <https://www.ccacoalition.org/news/cooling-all-18th-sustainable-development-goal>.
- CE. 2017. «Decisione (UE) 2017/1541 del Consiglio del 17 luglio 2017 relativa alla conclusione, per conto dell'Unione europea, dell'Emendamento di Kigali al Protocollo di Montreal sulle sostanze che

- riducono lo strato di ozono.» <https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2017/1541/oj/eng>.
- CE. 2025a. «Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici». <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/paris-agreement-climate/>.
- CE. 2025b. «Council Publishes 2024 International Climate Finance Figures». <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/10/27/council-publishes-2024-international-climate-finance-figures/>.
- COM. 2019. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green Deal. 640 Final, Bruxelles.
- COM. 2020. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Powering a Climate-Neutral Economy: An EU Strategy for Energy System Integration. 299 Final, Bruxelles.
- COM. 2021a. COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI «Pronti per il 55 %»: Realizzare l'obiettivo Climatico Dell'UE per il 2030 Lungo Il Cammino Verso La Neutralità Climatica.
- COM. 2021b. Regolamento (UE) 2021/1119 del Parlamento europeo e del Consiglio del 30 giugno 2021 che istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica e che modifica il regolamento (CE) n. 401/2009 e il regolamento (UE) 2018/1999 («Normativa europea sul clima»). Vol. 243.
- COM. 2024a. «How the EU Is Greening Energy». [https://www.consilium.europa.eu/en/policies/how-the-eu-is-greening-energy/?utm\\_source](https://www.consilium.europa.eu/en/policies/how-the-eu-is-greening-energy/?utm_source).
- COM. 2024b. «In che modo l'UE rende più ecologica l'energia». <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/how-the-eu-is-greening-energy/>.
- COM. 2025a. «Cambiamenti climatici: il contributo dell'UE». <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/>.
- COM. 2025b. «Pronti per il 55%». <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/fit-for-55/>.
- Directive (EU) 2024/1275. 2024. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the Energy Performance of Buildings (Recast) (Text with EEA Relevance).
- EEA. 2021. «Time Series of Population-Weighted Heating and Cooling Degree Days Averaged over Europe». <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/trend-in-heating-and-cooling-2>.
- ENEA. 2024. «Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica 2024». <https://www.energiaenergetica.enea.it/pubblicazioni/raee-rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica/https%3A%2F%2Fwww.energiaenergetica.enea.it%2Fpubblicazioni%2Fraee-rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica%2Frapporto-annuale-sull-efficienza-energetica-2024.html>.
- Grosso, Mario. 2008. «Il raffrescamento passivo degli edifici - II edizione». <https://www.maggiolieditore.it/il-raffrescamento-passivo-degli-edifici-iv-edizione.html>.
- IEA. 2018. «The Future of Cooling – Analysis». <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>.
- IEA. 2021. «Net Zero by 2050 – Analysis». <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- IEA. 2023a. «Electricity Market Report 2023 – Analysis». <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>.
- IEA. 2023b. «Sustainable, Affordable Cooling Can Save Tens of Thousands of Lives Each Year – Analysis». <https://www.iea.org/reports/sustainable-affordable-cooling-can-save-tens-of-thousands>.



of-lives-each-year.

IEA. 2025. «Staying Cool without Overheating the Energy System – Analysis». <https://www.iea.org/commentaries/staying-cool-without-overheating-the-energy-system>.

IPCC. 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. a cura di P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, e J. Malley.

IPCC. 2023. «AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023». <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

ISPRA. 2025. «Le emissioni di gas serra in Italia: obiettivi di riduzione e scenari emissivi». <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/le-emissioni-di-gas-serra-in-italia-obiettivi-di-riduzione-e-scenari-emissivi-2025>.

ITACA. 2004. «Itaca». [https://www.itaca.org/edilizia\\_sostenibile\\_protocollo\\_en\\_amb.asp](https://www.itaca.org/edilizia_sostenibile_protocollo_en_amb.asp).

Khosla, Radhika, Nicole Miranda, Philipp Trotter, Antonella Mazzone, Renaldi Renaldi, Caitlin Mcelroy, Francois Cohen, Anant Jani, Rafael Perera-Salazar, e Malcolm McCulloch. 2020. «Cooling for sustainable Development». *Nature Sustainability* 4. doi:10.1038/s41893-020-00627-w.

Losasso, Mario. 2022. «Interconnected Crises and Design Complexity». *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment* 7–9. doi:10.36253/techne-12913.

Losasso, Mario, Maria teresa Lucarelli, Marina Rigillo, e Renata Valente. 2020. *Adattarsi al Clima Che Cambia Innovare La Conoscenza per Il Progetto Ambientale*. Santarcangelo di Romagna (RN).

Lutman, Francesco. 2020. «PIANO NAZIONALE INTEGRATO PER L'ENERGIA E IL CLIMA (PNIEC)». <https://www.mimit.gov.it/index.php/it/notizie-stampa/pniec2030>.

Maccarelli, Marco. 2023. «Obiettivi Emendamento di Kigali / Note». <https://www.certifico.com/ambiente/news-ambiente/obiettivi-emendamento-di-kigali-note>.

MASE. 2019. «PIANO NAZIONALE INTEGRATO PER L'ENERGIA E IL CLIMA Ministero dello Sviluppo Economico Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti». <https://www.mase.gov.it/portale/-/pubblicato-il-testo-definitivo-del-piano-energia-e-clima-pniec->.

MASE. 2021. «Newsletter n.14/2022 - La Situazione energetica Nazionale nel 2021». <https://www.mase.gov.it/portale/-/newsletter-n.14-2022-la-situazione-energetica-nazionale-nel-2021>.

MASE. 2024. «Clima - Energia: l'Italia ha inviato il PNIEC a Bruxelles». <https://www.mase.gov.it/portale/-/clima-energia-l-italia-ha-inviato-il-pniec-a-bruxelles>.

MIMIT. 2019. «PIANO NAZIONALE INTEGRATO PER L'ENERGIA E IL CLIMA Ministero dello Sviluppo Economico Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti». <https://www.mimit.gov.it/>.

MIMIT. 2022. «PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA E PIANO NAZIONALE COMPLEMENTARE Stato di attuazione degli interventi di competenza del MIMIT».

Novosel, Tomislav, Marino Grozdek, Julije Domac, e Neven Duić. 2021. «Spatial assessment of cooling demand and district cooling potential utilizing public data». *Sustainable Cities and Society* 75:103409. doi:10.1016/j.scs.2021.103409.

Perpignani, Fabio. 2023. «PIANO NAZIONALE INTEGRATO PER L'ENERGIA E IL CLIMA: OBIETTIVI 2030 – Safety Business». <https://safetybusiness.it/piano-nazionale-integrato-per-lenergia-e-il-clima-obiettivi-2030/>.

Pfenninger, Stefan, Adam Hawkes, e James Keirstead. 2014. «Energy systems modeling for twenty-first



- century energy challenges». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33:74–86. doi:10.1016/j.rser.2014.02.003.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri. 2021. «PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA- NEXTGENERATIONITALIA».
- Randazzo, S., F. Vicari, J. Lopez, M. Salem, R. Lo Brutto, S. Azzouz, S. Chamam, S. Cataldo, N. Muratore, M. Fernandez de Labastida, V. Valles, A. Pettignano, G. D. `Ali Staiti, S. Pawlowski, A. Hannachi, J. L. Cortina, e A. Cipollina. 2024. «Unlocking Hidden Mineral Resources: Characterization and Potential of Bitterns as Alternative Sources of Critical Raw Materials». *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 436.
- Ritchie, Hannah. 2024. «Air conditioning causes around 3% of greenhouse gas emissions. How will this change in the future?» *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/air-conditioning-causes-around-greenhouse-gas-emissions-will-change-future>.
- Salata, Ferdinando, Serena Falasca, Virgilio Ciancio, Gabriele Curci, Stefano Grignaffini, e Pieter de Wilde. 2022. «Estimating building cooling energy demand through the Cooling Degree Hours in a changing climate: A modeling study». *Sustainable Cities and Society* 76:103518. doi:10.1016/j.scs.2021.103518.
- SEforALL. 2025. «Cooling and energy efficiency at the SEforALL Global Forum in Barbados». <https://www.seforall.org/news/cooling-and-energy-efficiency-at-the-seforall-global-forum-in-barbados>.
- Talluri, Marco. 2022. «Ondate di calore in Europa: come mantenere gli edifici freschi in modo sostenibile?» <https://ambientenonsolo.com/ondate-di-calore-in-europa-come-mantenere-gli-edifici-freschi-in-modo-sostenibile/>.
- Tucci, Fabrizio. 2020. «Atlante dei sistemi tecnologici per l'architettura bioclimatica: Raffrescamento passivo in architettura /Atlas of technological systems for bioclimatic architecture: Passive cooling in architecture». vol.2.
- Tucci, Fabrizio, Thomas Herzog, e Edo Ronchi. 2018. *Costruire e abitare green. Approcci, strategie, sperimentazioni per una progettazione tecnologica ambientale-Green building and dwelling. Approaches, strategies, experimentation for an environment...* Firenze: Altralinea Edizioni.
- UE. 2018. «Regolamento (UE) 2018/1999». [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/LSU/?uri=oj:OL\\_2018\\_328\\_R\\_0001](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/LSU/?uri=oj:OL_2018_328_R_0001).
- UNEP. 2019. «The Kigali Amendment to the Montreal Protocol: HFC Phase-down | Ozonaction». <https://www.unep.org/ozonaction/resources/factsheet/kigali-amendment-montreal-protocol-hfc-phase-down>.
- UNEP. 2022a. «2022 Global Status Report for Buildings and Construction | UNEP - UN Environment Programme». <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>.
- UNEP. 2022b. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.
- UNEP. 2023a. «Global Cooling Pledge for COP28». <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/44310>.
- UNEP. 2023b. «Global Cooling Watch 2023 | UNEP - UN Environment Programme». <https://www.unep.org/resources/global-cooling-watch-2023>.
- UNEP. 2023c. «The Kigali Amendment to the Montreal Protocol: HFC Phase-down | Ozonaction». <https://www.unep.org/ozonaction/resources/factsheet/kigali-amendment-montreal-protocol-hfc-phase-down>.

- UNEP. 2024a. «Global Cooling Watch 2023 - Keeping It Chill: How to Meet Cooling Demands While Cutting Emissions - Annexes». <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/45178>.
- UNEP. 2024b. «Rapporto sullo stato globale degli edifici e delle costruzioni | UNEP - Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente». <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction>.
- UNEP. 2025a. «Global Cooling Watch 2025 | UNEP - UN Environment Programme». <https://www.unep.org/resources/global-cooling-watch-2025>.
- UNEP. 2025b. «Sustainable Cooling». <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/48931>.
- UNFCCC. 2015. «The Paris Agreement | UNFCCC». <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.
- UNFCCC. 2021a. «COP26 outcomes: Transparency and reporting. United Nations Framework Convention on Climate Change». <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact/cop26-outcomes-transparency-and-reporting>.
- UNFCCC. 2021b. «Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its third session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021. Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement at its third session | UNFCCC». <https://unfccc.int/documents/460950>.
- UNI 10349-1. 2016. «UNI 10349-1:2016 - UNI Ente Italiano di Normazione - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata». <https://store.uni.com/uni-10349-1-2016>.
- UNI 10349-3. 2016. «UNI 10349-3:2016 - UNI Ente Italiano di Normazione - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici». <https://store.uni.com/uni-10349-3-2016>.
- UNI EN 12792. 2005. «UNI EN 12792:2005 - UNI Ente Italiano di Normazione - Ventilazione degli edifici - Simboli, terminologia e simboli grafici». <https://store.uni.com/uni-en-12792-2005>.
- UNI EN 15242. 2008. «UNI EN 15242:2008 - UNI Ente Italiano di Normazione - Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni». <https://store.uni.com/uni-en-15242-2008>.
- UNI EN 16798-1. 2019. «UNI EN 16798-1:2019 - UNI Ente Italiano di Normazione - Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6». <https://store.uni.com/uni-en-16798-1-2019>.
- UNI EN 16798-7. 2018. «UNI EN 16798-7:2018 - UNI Ente Italiano di Normazione - Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 7: Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici compresa l'infiltrazione (Moduli M5-5)». <https://store.uni.com/uni-en-16798-7-2018>.
- UNI EN ISO 13370. s.d. «UNI EN ISO 13370:2018 - UNI Ente Italiano di Normazione - Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo». Recuperato 17 febbraio 2026. <https://store.uni.com/uni-en-iso-13370-2018>.
- UNI EN ISO 13790. 2008. «UNI EN ISO 13790:2008 - UNI Ente Italiano di Normazione - Prestazione

energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento». <https://store.uni.com/uni-en-iso-13790-2008>.

UNI EN ISO 52016-1. 2018. «UNI EN ISO 52016-1:2018 - UNI Ente Italiano di Normazione - Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo». <https://store.uni.com/uni-en-iso-52016-1-2018>.

UNICEF. 2021. «The Cooling Dilemma amid Climate Change | Innocenti Global Office of Research and Foresight». <https://www.unicef.org/innocenti/cooling-dilemma-amid-climate-change>.

United Nations. 2015. «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development | Department of Economic and Social Affairs». <https://sdgs.un.org/2030agenda?utm>.

United Nations. 2023. The Sustainable Development Goals Report 2023: Special Edition. The Sustainable Development Goals Report. United Nations.

United Nations. 2025a. «— SDG Indicators». <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/>.

United Nations. 2025b. «Home — SDG Indicators». <https://unstats.un.org/sdgs/>.

UNI/TR 10349-2. 2016. «UNI/TR 10349-2:2016 - UNI Ente Italiano di Normazione - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto». <https://store.uni.com/uni-tr-10349-2-2016>.

UNI/TS 11300-1. 2014. «UNI/TS 11300-1:2014 - UNI Ente Italiano di Normazione - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale». <https://store.uni.com/uni-ts-11300-1-2014>.

UNI/TS 11300-2. 2019. «UNI/TS 11300-2:2019 - UNI Ente Italiano di Normazione - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali». <https://store.uni.com/uni-ts-11300-2-2019>.

UNI/TS 11300-3. 2010. «UNI/TS 11300-3:2010 - UNI Ente Italiano di Normazione - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva». <https://store.uni.com/uni-ts-11300-3-2010>.

USGBC. 2022. «LEED v4 → LEED v4.1 Credit Changes (Building Design + Construction)». <https://www.usgbc.org/resources/bdc-v41-credit-overview>.

USGBC. 2023. «LEED\_v41\_BDC\_RS\_July\_2023\_tracked\_changes». <https://build.usgbc.org/bdc41>.

USGBC. 2025. «LEED\_v4.1\_BD\_C\_Guide\_November\_2025». [https://build.usgbc.org/bd+c\\_guide](https://build.usgbc.org/bd+c_guide).

USGBCU. 2022. «What is LEED certification?» <https://support.usgbc.org/hc/en-us/articles/4404406912403-What-is-LEED-certification>.

WMO. 2025. «WMO Confirms 2024 as Warmest Year on Record at about 1.55°C above Pre-Industrial Level». <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>.

#### *ABSTRACT (INGLESE)*

*Chapter 2 defines the theoretical and technological framework of passive cooling systems, considering them as structural components of bioclimatic design and of the preventive reduction of building energy demand. Passive cooling is interpreted not as a set of occasional or isolated solutions, but as an integrated system of physical and environmental strategies aimed at controlling heat flows, stabilizing thermohygrometric conditions, and limiting the reliance on mechanical air-conditioning. Within this perspective, the chapter develops a systematic review of the scientific literature, reconstructing the evolutionary continuity between traditional devices and contemporary technologies, and proposing an operational classification of the main dissipative mechanisms. The analysis traces passive cooling back to a limited number of fundamental physical principles—air movement, thermal mass, radiative exchanges, evaporative processes, and geothermal coupling—which constitute the shared theoretical foundation of the various technological families. The chapter articulates a methodological classification of passive systems, distinguishing between ventilative, radiant, evaporative, and geothermal cooling, and examines their operating mechanisms, conditions of applicability, and interactions with the overall energy performance of the building. Particular emphasis is placed on thermo-geothermal interaction systems, including buried ducts and air labyrinths, which exploit the thermal stability of the ground as a dissipative reservoir. Scientific studies report outlet air temperature reductions in earth-to-air systems on the order of 6–8 °C compared to outdoor conditions, highlighting the relevance of such devices in reducing cooling loads and stabilizing indoor environments. The Rome Technopole case study integrates different passive strategies designed to exploit local climatic conditions and the morphological characteristics of the building, with the aim of reducing dependence on mechanical systems. Among the devices considered are buried ducts, air labyrinths, ventilation towers, façade-integrated ventilation systems, and bioclimatic atria.*

## CAPITOLO 2 PASSIVE COOLING SYSTEM

### ABSTRACT

Il Capitolo 2 definisce il quadro teorico-tecnologico dei sistemi di raffrescamento passivo, assumendoli come componenti strutturali della progettazione bioclimatica e della riduzione preventiva della domanda energetica negli edifici. Il raffrescamento passivo è interpretato non come insieme di soluzioni episodiche, ma come sistema integrato di strategie fisiche e ambientali finalizzate al controllo dei flussi di calore, alla stabilizzazione delle condizioni termo-igrometriche e al contenimento del ricorso alla climatizzazione meccanica. In tale prospettiva, si sviluppa una ricognizione sistematica della letteratura scientifica, ricostruendo la continuità evolutiva tra dispositivi tradizionali e tecnologie contemporanee, così proponendo una classificazione operativa dei principali meccanismi dissipativi. L'analisi riconduce il raffrescamento passivo a un numero limitato di principi fisici fondamentali, movimento dell'aria, massa termica, scambi radiativi, processi evaporativi e accoppiamento geotermico, che costituiscono la base teorica comune delle diverse famiglie tecnologiche. Il capitolo articola una classificazione metodologica dei sistemi passivi, distinguendo raffrescamento ventilativo, radiante, evaporativo e geotermico, e ne analizza i meccanismi operativi, le condizioni di applicabilità e le interazioni con il comportamento energetico dell'edificio. Particolare rilievo è attribuito ai sistemi di interazione termo-geotermica, tra cui condotti interrati e labirinti d'aria, che sfruttano la stabilità termica del sottosuolo quale serbatoio dissipativo. Studi dai paper scientifici documentano differenze di temperatura dell'aria in uscita dai sistemi terra-aria dell'ordine di 6–8 °C rispetto alle condizioni esterne, evidenziando la rilevanza di tali dispositivi nella riduzione dei carichi di raffrescamento e nella stabilizzazione delle condizioni indoor. Il caso studio del Rome Technopole integra differenti strategie passive, concepite per sfruttare le condizioni climatiche locali e le caratteristiche morfologiche dell'edificio, con l'intento di ridurre la dipendenza da impianti meccanici. Tra i dispositivi considerati figurano condotti interrati, labirinti d'aria, torri di ventilazione, sistemi di ventilazione in facciata e atri bioclimatici.



## 2.1 *Passive cooling systems*: Principi e ruolo dei sistemi di raffrescamento passivo nell'architettura bioclimatica

I sistemi di raffrescamento passivo costituiscono un elemento fondamentale dell'architettura bioclimatica<sup>1</sup>, poiché si basano sull'impiego razionale e integrato delle risorse ambientali disponibili, quali l'irraggiamento solare, la ventilazione naturale e le proprietà di accumulo e rilascio termico dei materiali, per regolare le condizioni termo-igrometriche degli spazi interni. Attraverso un'attenta configurazione dell'involucro edilizio, della forma architettonica e delle relazioni con il contesto climatico locale, tali sistemi consentono di limitare l'ingresso e l'accumulo di calore durante la stagione estiva e di favorirne la dissipazione in modo naturale. In questo modo, il comfort ambientale può essere mantenuto o migliorato riducendo in maniera significativa la dipendenza da dispositivi meccanici di climatizzazione e, conseguentemente, i consumi energetici e le emissioni associate al loro funzionamento (Olgyay et al., 2015; Szokolay, 2014).

Tali sistemi agiscono attraverso un insieme coordinato e integrato di strategie progettuali che intervengono sia sulla configurazione volumetrica dell'edificio sia sulle caratteristiche fisiche e prestazionali dell'involucro, con l'obiettivo di adattare il comportamento termo-energetico dell'architettura alle specificità del clima locale. La modellazione della forma, l'orientamento, la distribuzione delle superfici opache e trasparenti, nonché la selezione dei materiali e dei dispositivi di controllo solare e di ventilazione, vengono così impiegati per ottimizzare l'interazione tra edificio e ambiente esterno. In questo modo è possibile massimizzare l'efficienza energetica complessiva dell'organismo edilizio e, al contempo, migliorare in maniera sostanziale la qualità delle condizioni ambientali interne, in termini di comfort termico, qualità dell'aria e benessere degli occupanti (Givoni, 1994).

Un approccio di tipo integrato, che non si limiti all'analisi del singolo organismo edilizio ma consideri anche la scala urbana e il ruolo delle infrastrutture verdi e blu, consente di affrontare in modo più sistemico e efficace le criticità legate al microclima. Il settore delle costruzioni è progressivamente orientato verso lo sviluppo di un'e-

1. L'architettura bioclimatica è la progettazione di edifici che si adattano e sfruttano le caratteristiche climatiche della regione in cui si trovano. Questi edifici sono progettati in modo intelligente per proteggere dalle alte temperature estive e dalle basse temperature invernali. Un aspetto fondamentale dell'architettura bioclimatica è quello di raggiungere un equilibrio tra surriscaldamento e raffreddamento.

dilizia interattiva, capace di incidere in modo significativo sull'attuale scenario attraverso il rafforzamento delle capacità di resilienza delle città e degli edifici.

A scala urbana, tale approccio si traduce nella gestione integrata degli spazi costruiti e aperti, della vegetazione e delle superfici permeabili, elementi che concorrono a modulare i flussi di calore, aria e umidità all'interno del tessuto urbano, contribuendo alla riduzione degli effetti dell'isola e delle ondate di calore e al miglioramento delle condizioni microclimatiche locali. A scala edilizia, invece, questo orientamento si concretizza nella massimizzazione dell'impiego di sistemi bioclimatici di riscaldamento passivo, protezione solare, ventilazione naturale e raffrescamento passivo, in grado di incrementare il comfort e il benessere ambientale con un impatto ambientale contenuto o, in alcuni casi, pressoché nullo (Losasso et al., 2020). In questa prospettiva, la progettazione bioclimatica non solo migliora le prestazioni dei singoli edifici, ma contribuisce anche a una maggiore resilienza degli insediamenti nel loro complesso e a un rafforzamento duraturo della sostenibilità ambientale (IPCC, 2022; Tucci et al., 2018).

L'adozione sistematica di strategie passive consente di incrementare l'efficienza energetica complessiva degli edifici, riducendo il ricorso ai sistemi di climatizzazione attiva e favorendo il miglioramento del comfort termoigrometrico interno (Santamouris & Kolokotsa, 2013; Campaniço et al., 2014). La diminuzione della domanda energetica per il raffrescamento rappresenta inoltre un elemento chiave nelle politiche di sostenibilità e nelle strategie di adattamento ai cambiamenti climatici (Ascione, 2017).

Infatti, sebbene il miglioramento dell'efficienza energetica e la diffusione delle fonti rinnovabili costituiscano strumenti essenziali per la riduzione dei consumi, tali misure non risultano sempre sufficienti ad affrontare integralmente la sfida climatica. Nel caso specifico del raffrescamento degli edifici, assumono particolare rilievo sia le emissioni associate alla produzione di energia, sia il calore di scarto generato dai condensatori dei sistemi meccanici. Entrambe queste criticità possono essere efficacemente mitigate attraverso la riduzione preventiva della domanda di raffrescamento, obiettivo perseguibile soprattutto mediante l'integrazione coerente di strategie passive nella progettazione (Salata et al., 2022). In sintesi, la dissipazione del calore verso pozzi naturali a bassa temperatura si configura come un principio cardine della progettazione bioclimatica, capace di coniugare efficienza energetica, qualità ambientale interna e sostenibilità.

Numerosi contributi della letteratura scientifica dimostrano che



l'applicazione integrata e sinergica di più strategie di raffrescamento e controllo passivo è in grado di produrre riduzioni sostanziali dei consumi energetici degli edifici, prolungando al contempo le condizioni di comfort termo-igrometrico per gli occupanti nel corso delle stagioni calde. L'efficacia di tali approcci risulta particolarmente significativa nel contesto dell'attuale crisi climatica, caratterizzata da un aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi di caldo estremo e da una crescente domanda di climatizzazione. In questo quadro, le soluzioni passive assumono un ruolo strategico non solo come strumenti di efficienza energetica, ma anche come componenti chiave delle politiche di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici, contribuendo a ridurre le emissioni associate all'uso dell'energia e a rafforzare la sostenibilità complessiva dell'ambiente costruito (IEA, 2018; Manzano-Agugliaro et al., 2015). Tali sistemi comprendono un complesso articolato di strategie progettuali e di soluzioni tecnologiche (Ibtissam et al., 2022; Y. Song et al., 2021) orientate alla diminuzione dei carichi termici durante la stagione estiva e al conseguente miglioramento delle condizioni di comfort termo-igrometrico negli ambienti interni, contribuendo così a una gestione più sostenibile delle prestazioni energetiche dell'edificio (Al-Shamkhee et al., 2022; Salata et al., 2022).

L'obiettivo condiviso da tali sistemi consiste nel favorire lo smaltimento del calore in eccesso accumulato negli ambienti costruiti attraverso il trasferimento di energia verso pozzi termici naturali caratterizzati da temperature più basse rispetto a quelle dell'edificio. Questi dissipatori ambientali, che comprendono l'aria esterna, il cielo, l'acqua e il terreno, rappresentano risorse fisiche fondamentali a cui l'architettura bioclimatica può attingere per riequilibrare le condizioni termiche interne, sfruttando i gradienti di temperatura e i meccanismi naturali di scambio termico al fine di limitare la necessità di interventi meccanici di raffrescamento (Prieto et al., 2017; Santamouris & Kolokotsa, 2013; Y. Song et al., 2021; Toroxel & Silva, 2024), limitando il ricorso a dispositivi meccanici ad alta intensità energetica (Tucci et al., 2018; UNEP, 2023).

Dal punto di vista fisico, i processi alla base del raffrescamento passivo possono essere ricondotti a un insieme limitato di principi fondamentali, che costituiscono il fondamento teorico su cui si basano le diverse tipologie di soluzioni e dispositivi adottati in ambito bioclimatico. Come evidenziato da Al-Azri et al., tali principi includono l'impiego della massa termica per l'accumulo e il rilascio ritardato del calore, il movimento dell'aria quale meccanismo di trasporto energetico e di incremento degli scambi convettivi, e il raffrescamento evaporativo, che sfrutta il calore latente associato ai processi

2. Nato e sviluppato nell'antica Persia, il qanat è un sistema di trasporto prevalentemente tramite canali sotterranei dell'acqua, studiato proprio per i paesi con un clima arido; questa parola in origine significava proprio 'canale'.



*Figura 2.1 Il qanat persiano: i qanat di Bam. Fonte: UNESCO World Heritage Centre – The Persian Qanat. <https://whc.unesco.org/en/list/1506/gallery/>*



*Figura 2.2 Il qanat persiano: il qanat di Mozd Abad. Fonte: UNESCO World Heritage Centre – The Persian Qanat. <https://whc.unesco.org/en/list/1506/gallery/>*

di evaporazione.

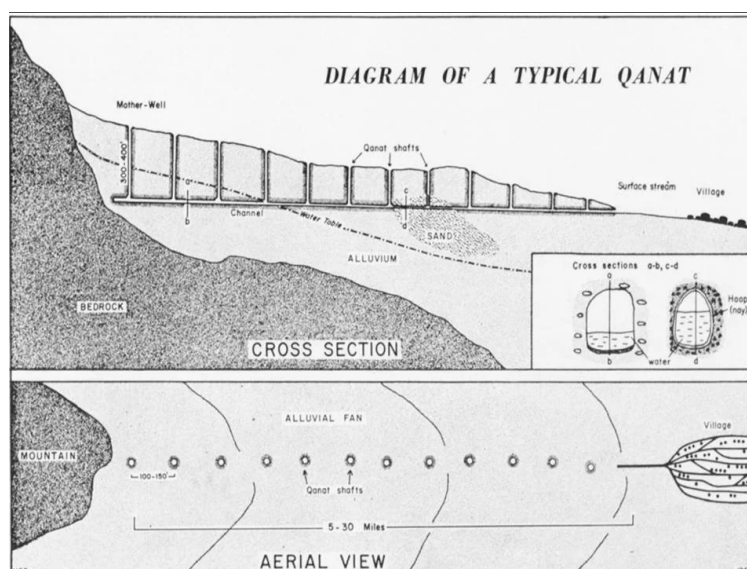
A questi si affiancano ulteriori meccanismi complementari, quali il raffrescamento radiativo, basato sull'emissione di energia verso il cielo notturno, e il raffrescamento geotermico, che utilizza la stabilità termica del terreno come serbatoio di dissipazione, ampliando il ventaglio di soluzioni disponibili per il controllo passivo delle condizioni termiche negli edifici (Al-Azri et al., 2025). Questi meccanismi operano singolarmente o in combinazione, dando origine a soluzioni costruttive che vanno oltre le tecniche tradizionali (Ascione et al., 2016; Lechner, 2009).

### 2.1.1 Evoluzione dei sistemi di raffrescamento passivo: dalle soluzioni tradizionali dell'antichità alle tecnologie innovative contemporanee

Fin dalle prime forme insediative, le pratiche architettoniche tradizionali fanno largo uso di strategie passive per gestire il microclima, per affrontare le condizioni climatiche estreme, in particolare nei climi con estati calde e secche e inverni miti e piovosi come quello mediterraneo, prefigurando principi oggi fondamentali nell'ambito della progettazione sostenibile e sviluppati in assenza di tecnologie meccaniche (Buono, 1998; Bori, 2006; Ferrucci & Peron, 2018; Grosjean et al., 2025). Le tecniche di raffrescamento passivo costituiscono una delle forme più antiche e al tempo stesso raffinate di climatizzazione passiva (Ascione et al., 2016). Un esempio particolarmente significativo, appartenente alla tradizione costruttiva delle culture persiana e islamica, è rappresentato dai **qanat**<sup>2</sup> (Figura 2.1-2.2): complessi sistemi di canali sotterranei, sviluppati a partire dal I millennio a.C., progettati per convogliare acqua fresca dalle falde profonde verso gli insediamenti.

Oltre alla funzione idrica, tali infrastrutture svolgevano anche un ruolo climatico rilevante, in quanto sfruttavano la temperatura più stabile del sottosuolo per favorire la ventilazione degli ambienti e contribuire al raffrescamento naturale degli edifici e degli spazi abitati (Figura 2.3).

Tali sistemi, che possono essere considerati precursori degli attuali labirinti termici, si articolavano in una rete di gallerie scavate nel sottosuolo, destinate a convogliare aria e acqua lungo percorsi protetti dalle variazioni climatiche esterne. Il terreno, caratterizzato da una temperatura più stabile e generalmente inferiore rispetto a quella superficiale, agiva come vero e proprio dissipatore termico. L'aria calda proveniente dall'esterno veniva fatta transitare attraverso questi condotti sotterranei, talvolta integrati con torri del vento



*Figura 2.3 Schema di funzionamento di un qanat tradizionale: sezione longitudinale e vista aerea di un sistema idraulico sotterraneo a lieve pendenza, composto da una galleria di adduzione e da una serie di pozzi verticali di ventilazione e accesso, utilizzato storicamente per captare e convogliare l'acqua dalle falde montane verso gli insediamenti, garantendo approvvigionamento idrico e mitigazione termica in climi aridi. Fonte: r/dune, Reddit - [https://www.reddit.com/r/dune/comments/754zqe/tl\\_a\\_qanat\\_is\\_a\\_gently\\_sloping\\_underground/?tl=it](https://www.reddit.com/r/dune/comments/754zqe/tl_a_qanat_is_a_gently_sloping_underground/?tl=it)*

(badgir<sup>3</sup> o malqaf) che potenziavano il tiraggio naturale, e, grazie agli scambi con l'umidità e la massa termica del suolo, raggiungeva gli ambienti abitati già raffreddata, contribuendo in modo significativo al miglioramento del comfort interno (Bahadori, 1978), garantendo così una significativa mitigazione delle condizioni climatiche estreme e un miglioramento del comfort abitativo (Figura 2.4) (Lechner, 2009; Ghandi & Leone, 2024).

Ad esempio, Jomehzadeh et al. (2020) descrivono l'uso tradizionale di badgir in varie regioni dell'Iran, dove la forma, l'orientamento e il dimensionamento dipendono fortemente dal vento dominante, dall'umidità e dalla disponibilità di masse termiche (Jomehzadeh et al., 2020). Soluzioni simili furono adottate anche in contesti aridi come l'Egitto faraonico, la Persia e le regioni mesopotamiche, dove il raffrescamento degli ambienti era ottenuto combinando ventilazione naturale ed elementi umidi. Strutture architettoniche quali i windcatcher (torri del vento) convogliavano l'aria verso pozzi, corsi d'acqua o superfici bagnate, favorendo la diminuzione della temperatura interna grazie all'evaporazione dell'acqua, secondo principi oggi riconducibili al trasferimento di calore e massa. Pur in assenza di dispositivi meccanici, questo approccio costituisce una delle prime espressioni di raffrescamento evaporativo passivo. L'integrazione tra ombreggiamento e presenza d'acqua amplificava l'effetto rinfrescante, contribuendo efficacemente alla riduzione delle temperature e al miglioramento del comfort termico negli spazi abita-

3. Il badgir (o malqaf nella tradizione araba) è un dispositivo architettonico tradizionale di ventilazione passiva, diffuso nei climi caldi e aridi del Medio Oriente e del Nord Africa. Si tratta di una torre del vento che intercetta le correnti d'aria in quota e le convoglia verso gli ambienti interni, favorendo il raffrescamento naturale degli spazi. Il funzionamento si basa su differenze di pressione e temperatura: l'aria più fresca viene indirizzata all'interno mentre quella calda viene espulsa, spesso con il supporto dell'inerzia termica delle murature o di superfici umidificate che amplificano l'effetto di raffreddamento evaporativo. Questo sistema rappresenta un esempio emblematico di strategia bioclimatica, capace di migliorare il comfort indoor senza ricorrere a energia meccanica.



*Figura 2.4* Sistema urbano di torri del vento (badgir) nella città storica di Yazd (Iran). Fonte: Heritage Institute. <https://www.heritageinstitute.com>

tivi e collettivi (Givoni, 1994; Izadpanahi et al., 2021). In India, le grandi cisterne e i stepwells (*Figura 2.5*) svolgevano una funzione climatica oltre che idrica, creando spazi freschi sfruttabili durante le stagioni calde; a Maghreb e nel Vicino Oriente, a conferma di una conoscenza diffusa e radicata dell'interazione tra suolo, aria e microclima. In parallelo, in molte altre culture si svilupparono metodi passivi per la ventilazione naturale e il controllo del calore, come i wind towers (torri del vento) di Dubai e Hyderabad, i mashrabiya arabi o i cortili ombreggiati con fontane dell'Alhambra di Granada. Questi dispositivi miglioravano la ventilazione, favorivano il raffrescamento evaporativo e creavano microclimi abitabili in ambienti ostili.

Alcuni studi recenti che analizzano tali sistemi evidenziano come queste soluzioni vernacolari abbiano costituito un riferimento concettuale per lo sviluppo di tecnologie passive e ibride moderne, ponendo le basi per gli attuali modelli di raffrescamento evaporativo impiegati in edilizia sostenibile (per esempio raffrescamento diagnosi e applicazioni integrate con ventilazione naturale) (Salimi et al., 2025a). Nel contesto mediterraneo le abitazioni vernacolari del sud Italia, come nel Borgo della Corricella a Procida o nel centro storico di Forio d'Ischia, mostrano come l'uso del tufo, i vani ipogei e i condotti d'aria scavati nella roccia abbiano garantito condizioni di comfort anche nei mesi più caldi (*Figura 2.6*) (Buono, 1998). In particolare, strutture come le abitazioni rupestri della Cappadocia, i trulli di Puglia, le case trogloditiche di Matmata e le cisterne sotterranee romane testimoniano come l'interazione tra massa termica e ventilazione naturale fosse alla base di un'efficace mitigazione del calore (Lechner, 2009).

*Figura 2.5* Esempi di torri del vento tradizionali (barjeel) nell'architettura vernacolare di Dubai: (a) torre del vento in struttura Areesh, realizzata con materiali vegetali locali; (b) torre del vento in muratura di corallo. Fonte: ResearchGate – The Impact of Heritage on Contemporary Sustainable Interior Design Solutions. <https://www.researchgate.net>





Tra i precedenti più significativi si colloca l'hypocaustum romano, dispositivo che sfruttava la circolazione di aria calda sotto il pavimento e all'interno delle pareti per riscaldare gli ambienti in modo uniforme. Pur non essendo un sistema geotermico in senso stretto, esso introduce principi fondamentali che ritroviamo nelle tecnologie contemporanee: l'impiego della massa edilizia come accumulatore termico, la distribuzione dell'energia tramite flussi d'aria e l'integrazione tra struttura e impianto. Nel sistema romano, il calore generato da una fornace veniva convogliato in un'intercapedine sotto il pavimento rialzato e successivamente distribuito nelle murature attraverso condotti verticali. La massa lapidea e laterizia assorbiva energia termica per poi rilasciarla gradualmente negli ambienti, garantendo stabilità e comfort. Questo meccanismo anticipa la logica dei moderni sistemi a massa attiva e dei labirinti termici, nei quali il sottosuolo o il calcestruzzo strutturale svolgono la funzione di volano energetico. La continuità concettuale tra hypocaustum e sistemi geotermici contemporanei risiede nella comprensione empirica dell'inerzia termica e della regolazione passiva delle condizioni interne. Se oggi il trasferimento di calore avviene tramite scambio con il terreno a temperatura relativamente stabile, il principio rimane analogo: sfruttare differenze termiche naturali e capacità di accumulo per ridurre il fabbisogno energetico attivo. In questa prospettiva storica, l'evoluzione dei sistemi geotermici può essere letta non come innovazione isolata, ma come sviluppo tecnologico di una tradizione millenaria di integrazione tra architettura, materia e controllo climatico (Figura 2.6a).

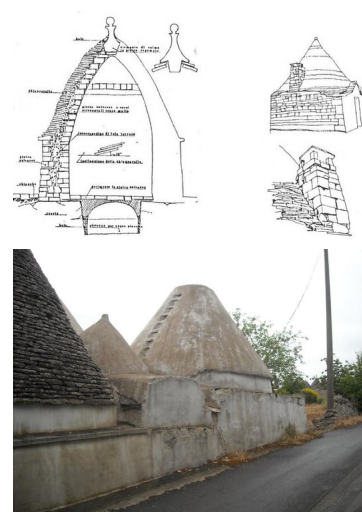
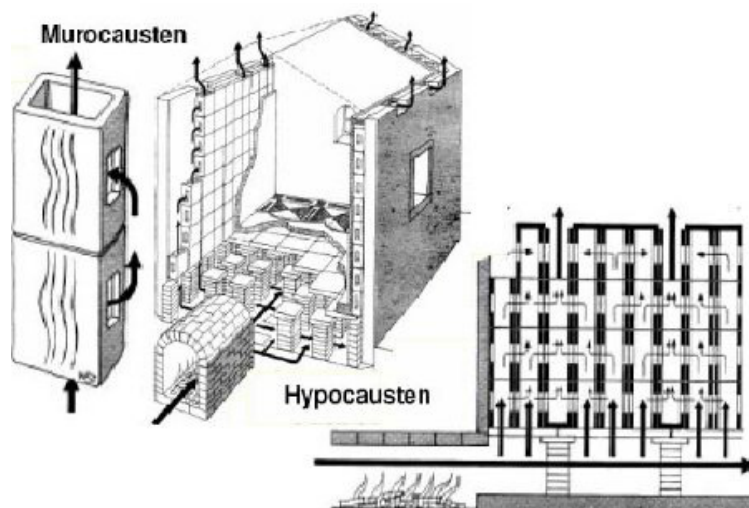


Figura 2.6 Struttura spaziale e configurazione costruttiva del trullo pugliese: schema sezioneale della doppia involucrazione muraria e della copertura conica in pietra a secco (in alto), e vista esterna dell'organismo edilizio (in basso). Fonte: ResearchGate – HBIM to recovery the trulli in Apulia, Southern Italy. [https://www.researchgate.net/publication/367718707\\_HBIM\\_to\\_recovery\\_the\\_trulli\\_in\\_Apulia\\_Southern\\_Italy/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/367718707_HBIM_to_recovery_the_trulli_in_Apulia_Southern_Italy/figures?lo=1)

Figura 2.6a Schema del sistema romano di hypocaustum e delle muraure riscaldate (murocausten). Fonte: Florides et al., Geothermal Active Building Concept, ResearchGate.

In questi casi, il raffrescamento non è solo frutto della massa termica, ma anche di una strategia urbana più ampia, in cui il posizionamento degli edifici e la ventilazione canalizzata svolgono un ruolo chiave nel controllo microclimatico (Bori, 2006). In particolare, dispositivi moderni come i labirinti termici (thermal labyrinths) e i tubi interrati (earth tubes) sono evoluzioni dirette di queste soluzioni antiche. Essi consistono in condotti sotterranei, realizzati con materiali ad alta capacità termica, attraverso cui l'aria esterna viene fatta passare e raffreddare prima di essere introdotta nell'edificio. Numerosi studi recenti dimostrano come questi sistemi possano ridurre la temperatura dell'aria anche di 6–8 °C rispetto all'esterno, migliorando significativamente l'efficienza energetica degli edifici (Xiong et al., 2019). Con l'avvento dell'era industriale e della climatizzazione artificiale, tali pratiche tradizionali furono progressivamente abbandonate, soprattutto nei Paesi occidentali.

La crisi energetica degli anni '70 ha però segnato una riscoperta delle strategie passive, stimolando studi pionieristici sull'architettura bioclimatica (Olgyay et al., 2015) e promuovendo un approccio integrato all'efficienza energetica degli edifici. Questa continuità storica dimostra come il raffrescamento evaporativo rappresenti una strategia robusta e ancora attuale per il controllo passivo del microclima, particolarmente rilevante nell'odierno contesto di crescente domanda di raffrescamento e di necessità di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti (Cuce, 2025).

Tale panorama storico e tecnologico, che attraversa epoche, culture e aree geografiche differenti, costituisce una base per analizzare l'evoluzione dei sistemi passivi di raffrescamento in chiave contemporanea. In tale prospettiva, introdurre una classificazione sistematica delle soluzioni passive risulta fondamentale per orientarsi tra le numerose tecnologie oggi disponibili e comprenderne le logiche applicative.

### 2.1.2 Principi generali del raffrescamento passivo: Il ruolo dei dissipatori naturali nella progettazione bioclimatica

Il raffrescamento passivo si fonda sul principio della dissipazione dell'energia termica in eccesso verso dissipatori naturali caratterizzati da temperature inferiori rispetto a quelle dell'edificio, in particolare l'aria, l'acqua, il suolo e il cielo. Le diverse modalità di scambio termico con tali dissipatori definiscono specifiche strategie: quando il calore viene ceduto all'aria ambiente si parla di raffrescamento convettivo; l'impiego dell'acqua sfrutta invece i processi di raffrescamento evaporativo; il terreno e il cielo, infine, costituiscono rispettivamente il riferimento per il raffrescamento geotermico e per quello radiativo (Santamouris, 2005). In questo quadro, il raffrescamento passivo si articola principalmente attraverso il controllo solare e la ventilazione naturale, includendo soluzioni progettuali quali ombreggiamento, scelta e dimensionamento delle superfici vetrate, orientamento dell'edificio e configurazioni di ventilazione monolaterale o trasversale, nonché l'utilizzo dell'effetto di galleggiamento e della ventilazione notturna (Prieto et al., 2017). I meccanismi fisici alla base di tali strategie possono essere ricondotti a tre principi fondamentali: l'impiego della massa termica, il movimento dell'aria e il raffrescamento evaporativo, che rappresentano i cardini sia delle tecniche costruttive tradizionali sia dei sistemi più evoluti (Al-Azri et al., 2025).

La ventilazione naturale assume un ruolo centrale non solo per garantire adeguate condizioni igienico-sanitarie mediante il ricambio d'aria, ma anche come efficace strumento di raffrescamento: il flusso d'aria contribuisce infatti alla rimozione del calore accumulato dalle strutture e, incrementando la velocità dell'aria, migliora il comfort termoigrometrico degli occupanti. A seconda delle esigenze progettuali, i flussi possono essere modulati per agire direttamente sul benessere degli utenti o per favorire la sottrazione di calore dagli elementi costruttivi. Ulteriori contributi derivano dallo sfruttamento dell'inerzia termica del suolo, che a profondità sufficienti mantiene temperature pressoché costanti, e dallo scambio radiativo verso il cielo, principio alla base dei sistemi radiativi e di soluzioni quali le coperture ad alta riflettanza ed emissività (Tucci, 2020).

Completano il quadro i sistemi di raffrescamento evaporativo, basati sugli scambi di calore latente, e la distinzione tra sistemi passivi diretti, che agiscono direttamente sulle condizioni dell'aria interna, e sistemi indiretti, che operano senza alterare la qualità dell'aria indoor (Laurini et al., 2016; Toroxel & Silva, 2024). In sintesi, le tecniche di dissipazione del calore mirano a trasferire l'energia termica

4. Il comportamento termico del terreno e il contributo degli scambi di calore attraverso il suolo possono essere valutati secondo quanto previsto dalla norma UNI/TS 13370:2018, che definisce i metodi di calcolo del trasferimento di calore attraverso il terreno e fornisce il quadro di riferimento tecnico per la determinazione delle prestazioni termiche degli edifici in relazione all'interazione con il suolo (Capitolo 1, § 1.7.5).

eccedente verso pozzi naturali a temperatura più bassa, configurandosi come elementi chiave della progettazione bioclimatica.

Tra i dissipatori naturali, il terreno<sup>4</sup> riveste un ruolo particolarmente rilevante grazie alle sue proprietà termiche e alla stabilità delle temperature in profondità. Esso può contribuire al raffrescamento degli edifici e delle serre agricole durante la stagione calda e, al contempo, fungere da sorgente di calore nei mesi invernali. È stato dimostrato che a circa 2,5–3 metri sotto la superficie la temperatura del suolo rimane pressoché costante nell'arco dell'anno, configurandosi come una riserva termica naturale sfruttabile nell'ambito della progettazione bioclimatica per migliorare le condizioni interne (Mihalakakou et al., 2022). L'efficacia dei processi dissipativi dipende essenzialmente da due condizioni: la disponibilità di un dissipatore adeguato, con una differenza di temperatura sufficiente a garantire il trasferimento di calore, e un efficiente accoppiamento termico tra edificio e dissipatore. In letteratura sono riconosciuti tre processi fondamentali: (i) il raffrescamento del terreno, basato sull'interazione termica con il suolo; (ii) il raffrescamento convettivo o ventilatorio, che utilizza l'aria ambiente; (iii) il raffrescamento evaporativo, che impiega l'acqua come mezzo dissipativo. A tali meccanismi si affianca il raffrescamento radiativo, fondato sull'emissione di radiazione a onde lunghe verso il cielo notturno, sebbene questo approccio non presenti ancora un consenso pienamente unanime in ambito scientifico e tecnico (Santamouris & Kolokotsa, 2013).



## 2.2 Metodologie di raffrescamento passivo: criteri di classificazione e principi operativi

Di seguito vengono esposti i criteri sistematici di classificazione dei sistemi di raffrescamento passivo, consolidati nella letteratura scientifica, e adottati al fine di ordinarne la varietà tecnologica, confrontarne le prestazioni e supportarne l'integrazione progettuale nei diversi contesti climatici e tipologici (Santamouris & Kolokotsa, 2013). Esistono cinque metodi di raffrescamento passivo: il raffrescamento ventilativo, il raffrescamento radiante, il raffrescamento evaporativo e il raffrescamento geotermico e la deumidificazione con essiccante, attraverso la rimozione del calore latente.

### 2.2.1 Raffrescamento ventilativo:

Nel quadro delle strategie di raffrescamento passivo, il raffrescamento ventilativo assume un ruolo centrale quale meccanismo di dissipazione del calore e di miglioramento del comfort termoigrometrico interno. La ventilazione naturale, in particolare, costituisce una soluzione chiave, poiché consente sia l'espulsione del calore accumulato negli ambienti interni sia la riduzione delle temperature percepite dagli occupanti, (Ayoobi et al., 2024; Chohan & Awad, 2022; Prieto et al., 2017; Santamouris & Kolokotsa, 2013). Il principio fisico sottostante è riconducibile ai moti convettivi naturali, per cui l'aria calda, meno densa, tende a salire mentre l'aria più fredda discende, instaurando un movimento ciclico che favorisce il trasporto e la rimozione del calore (Toroxel & Silva, 2024). Tecniche come la ventilazione unilaterale<sup>5</sup> e trasversale<sup>6</sup> (Duar-te, 2019a; Manimegalai, 2014), l'effetto camino e l'uso di torri del vento o camini solari (Kamal, 2012; Salimi et al., 2025b) possono ridurre efficacemente la temperatura interna, soprattutto in climi temperati e caldi (Al-Shamkhee et al., 2022; Pfafferott et al., 2004). In particolare, la ventilazione notturna<sup>7</sup> riveste un'importanza strategica nei climi temperati e caldi, poiché consente di raffreddare la massa termica dell'edificio accumulata durante il giorno, e per-raffreddarla di notte, contribuendo alla riduzione dei carichi termici (Al-Shamkhee et al., 2022; Pfafferott et al., 2004).

5. Dalla UNI CEN/TR 16798-4:2018: Ventilazione naturale unilaterale, se solo una delle pareti esterne di una stanza presenta aperture, la stanza è servita da ventilazione unilaterale, ad esempio una stanza chiusa con una sola finestra aperta. La ventilazione unilaterale è guidata dalla spinta termica, dalle differenze di pressione del vento sull'involucro edilizio e dalle fluttuazioni della velocità del vento. La profondità di penetrazione del flusso d'aria è limitata e la ventilazione unilaterale è quindi, come regola generale, raccomandata solo se la profondità della stanza non è maggiore di 2,5 volte l'altezza della stanza.

6. Dalla UNI CEN/TR 16798-4:2018: La ventilazione trasversale è una ventilazione naturale indotta dalle differenze di pressione del vento sull'involucro edilizio. Sul lato sopravento dell'edificio la pressione è relativamente alta, mentre la pressione sul lato sottovento dell'edificio e sui tetti bassi è relativamente bassa. Di norma, la ventilazione trasversale sarà efficace quando la profondità della stanza non è superiore a 5 volte l'altezza della stanza. Con tempo calmo non ci sarà alcuna forza motrice per la ventilazione.

7. Dalla UNICEN/TR 16798-4:2018: Durante il periodo estivo, quando la capacità di raffreddamento dell'aria esterna è massima di notte, la ventilazione naturale può rimuovere efficacemente il calore eccessivo accumulato dall'edificio (raffrescamento notturno dell'edificio) in modo che il livello di temperatura nell'edificio durante il giorno possa essere mantenuto entro i limiti di comfort o che la necessità di raffreddamento sia ridotta considerevolmente. Ciò è, tuttavia, subordinato alla presenza di strutture pesanti esposte e di elevati tassi di ricambio dell'aria ( $>4-6 \text{ h}^{-1}$ ).

L'efficacia di tali sistemi dipende dalla progettazione architettonica e dalle condizioni climatiche locali (Prieto et al., 2017; Santamouris & Kolokotsa, 2013).

Oltre a rappresentare un efficace strumento di raffrescamento, la ventilazione naturale è essenziale per il controllo della qualità dell'aria interna e per la prevenzione di fenomeni indesiderati, quali le condensazioni. Tuttavia, la sua applicazione richiede un'attenta gestione stagionale: durante i mesi invernali, l'immissione di aria fredda può compromettere il comfort termico, mentre nel periodo estivo essa può essere vantaggiosamente impiegata per raffrescare sia l'aria interna sia la massa termica dell'edificio, soprattutto nelle ore notturne (Duarte, 2019b).

Questa modalità può realizzarsi per via naturale, meccanica o mediante configurazioni ibride, a seconda delle condizioni climatiche e delle scelte progettuali. L'efficacia del raffrescamento ventilativo dipende in modo determinante dalla possibilità di utilizzare aria esterna di qualità adeguata e da condizioni termoigrometriche favorevoli. In generale, la ventilazione naturale risulta particolarmente efficace quando la temperatura esterna è inferiore o uguale a quella interna, condizione che consente di evitare fenomeni di surriscaldamento (Causone, 2016).

Le prestazioni della ventilazione naturale risultano strettamente correlate alle caratteristiche architettoniche dell'edificio. Configurazioni planimetriche snelle, caratterizzate da un elevato rapporto superficie/volume, favoriscono la penetrazione e la distribuzione dei flussi d'aria, mentre piante profonde possono ostacolare il ricambio naturale, richiedendo talvolta il supporto di sistemi meccanici. Analogamente, l'altezza dell'edificio e la disposizione delle aperture influenzano in modo significativo l'efficacia della ventilazione, poiché la velocità del vento e i gradienti di pressione variano con la quota e con l'esposizione (Tucci, 2020).

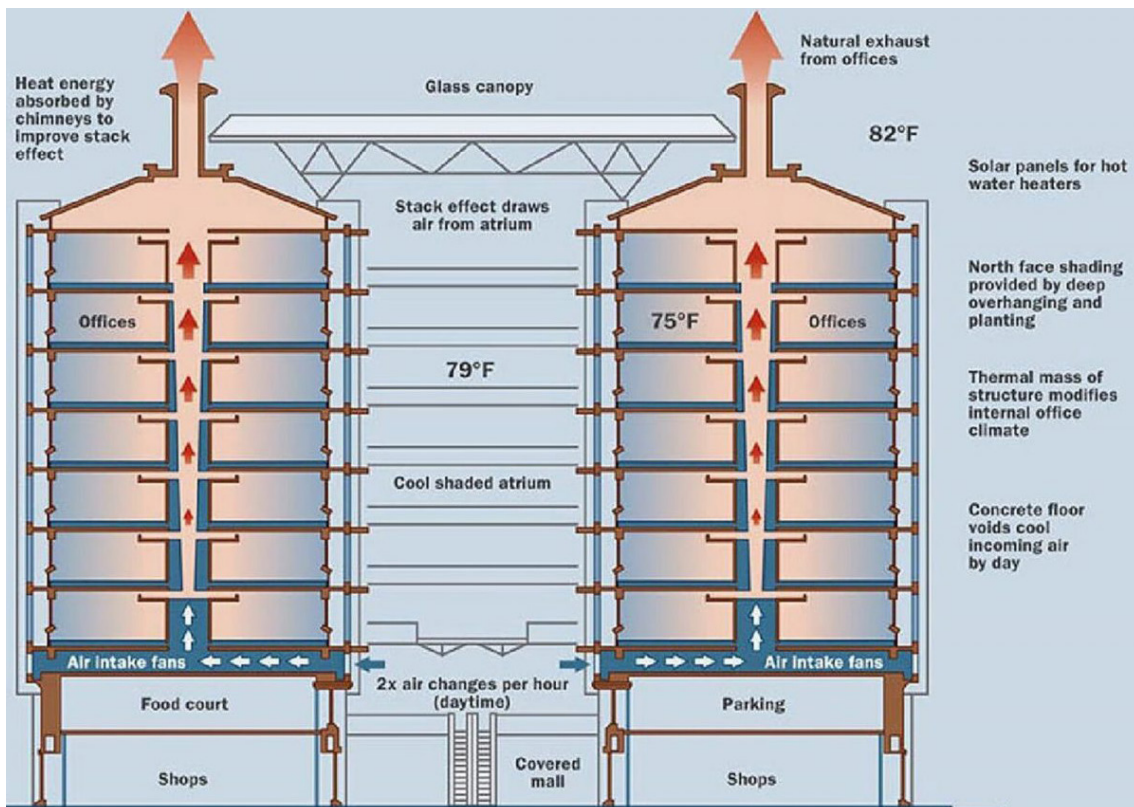
La scelta del metodo di ventilazione naturale più idoneo richiede pertanto una valutazione integrata di molteplici fattori, tra cui geometria degli spazi, altezza interna, massa termica esposta, guadagni di calore e qualità dell'ambiente esterno. Un'applicazione esemplare dei principi del raffrescamento ventilativo sopra descritti è rappresentata dall'Eastgate Centre di Harare, progettato dall'architetto Mick Pearce in collaborazione con gli ingegneri di Arup, rappresenta uno dei più importanti esempi di ventilazione naturale e raffrescamento passivo su larga scala (Figura 2.7-2.8).

Ispirato alle strategie di controllo termico dei termitai africani, l'edificio utilizza un sistema di ventilazione naturale auto-regolante che sfrutta correnti convettive per mantenere condizioni interne



*Figura 2.7* Vista esterna dell'Eastgate Centre (Harare, Zimbabwe).  
Fonte: Hidden Architecture <https://hiddenarchitecture.net/eastgate-centre/>

*Figura 2.8* Schema di funzionamento del sistema di ventilazione naturale dell'Eastgate Centre (Harare, Zimbabwe). Fonte: Hidden Architecture <https://hiddenarchitecture.net/eastgate-centre/>



8. Dalla UNI CEN/TR 16798-4:2018: Ventilazione naturale unilaterale, se solo una delle pareti esterne di una stanza presenta aperture, la stanza è servita da ventilazione unilaterale, ad esempio una stanza chiusa con una sola finestra aperta. La ventilazione unilaterale è guidata dalla spinta termica, dalle differenze di pressione del vento sull'involucro edilizio e dalle fluttuazioni della velocità del vento. La profondità di penetrazione del flusso d'aria è limitata e la ventilazione unilaterale è quindi, come regola generale, raccomandata solo se la profondità della stanza non è maggiore di 2,5 volte l'altezza della stanza.

confortevoli senza ricorrere alla climatizzazione meccanica. Durante la notte, l'aria esterna più fresca viene attirata verso il basso attraverso spazi e cavità sotterranee e, nel corso del giorno, l'aria calda interna risale e viene espulsa attraverso camini e condotti verticali, favorendo un ricambio continuo e un raffreddamento efficace degli spazi interni. Questo processo riduce drasticamente il consumo energetico per la ventilazione e il raffrescamento rispetto agli edifici convenzionali della stessa dimensione, dimostrando come un progetto bioclimatico ben calibrato possa sfruttare i dissipatori naturali (aria ambiente e massa termica) per ottimizzare il comfort interno in climi caldi.

Nonostante la semplicità concettuale del fenomeno, la previsione delle prestazioni ventilative risulta complessa e dipende da variabili interconnesse quali orientamento, configurazione delle aperture, contesto urbano e condizioni climatiche locali. In questo ambito, la fluidodinamica computazionale (CFD) rappresenta uno strumento avanzato di supporto progettuale, pur rimanendo fondamentale il contributo delle verifiche sperimentali (Jiang et al., 2023). Il raffrescamento ventilativo, se correttamente integrato nella progettazione bioclimatica, costituisce una strategia efficace per la riduzione dei carichi termici e per il miglioramento del comfort interno, contribuendo al contempo alla diminuzione dei consumi energetici degli edifici.

#### 2.2.1.1 Ventilazione su un solo lato (ventilazione unilaterale<sup>8</sup>)

La ventilazione monolaterale rappresenta la configurazione più elementare di ventilazione naturale, basata sull'impiego di una singola apertura, tipicamente una finestra o una presa d'aria in facciata, che consente simultaneamente l'ingresso dell'aria esterna e l'espulsione dell'aria interna. Il ricambio d'aria può avvenire attraverso la medesima apertura o mediante ulteriori aperture collocate sulla stessa parete. Nonostante la diffusione di tale soluzione, dovuta alla semplicità costruttiva e ai costi contenuti, essa presenta limitazioni prestazionali rilevanti. In particolare, il controllo del flusso risulta generalmente limitato a condizioni di apertura o chiusura, mentre l'efficacia del ricambio d'aria si riduce sensibilmente con l'aumentare della distanza dall'apertura, risultando significativa solo entro pochi metri dalla stessa. Inoltre, alcune tipologie di aperture monofacciali, quali le finestre tradizionali, trovano applicazione principalmente in climi moderati e risultano meno idonee durante la stagione invernale, quando l'immissione di aria fredda può compromettere il comfort termigrometrico interno. Dal punto di vista



analitico, la valutazione delle portate d'aria nella ventilazione monolaterale può essere condotta in conformità alla (UNI EN 16798-7, 2018),  
dove:

$$q_{V,arg,in} = 3600 \frac{\rho_{a,ref}}{\rho_{a,e}} \frac{A_{w,tot}}{2} [\max(C_{wnd} u_{10,site}^2; C_{st} h_{w,st} |T_z - T_e|)]^{0,5}$$

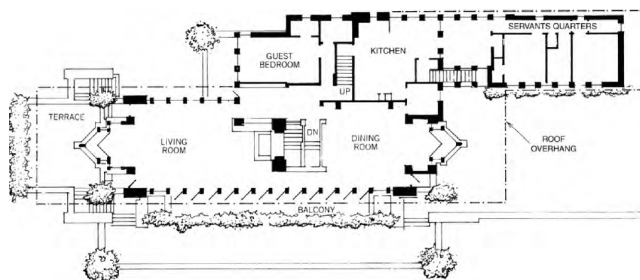
La portata entrante è:

$$q_{V,arg,out} = -3600 \frac{\rho_{a,ref}}{\rho_{a,z}} \frac{A_{w,tot}}{2} [\max(C_{wnd} u_{10,site}^2; C_{st} h_{w,st} |T_z - T_e|)]^{0,5}$$

Il termine principale dell'espressione di calcolo, presente sotto radice, rappresenta il contributo dominante tra la componente dinamica indotta dal vento e la componente termica associata all'effetto camino, consentendo di descrivere il comportamento del flusso d'aria in funzione delle condizioni ambientali e delle caratteristiche dell'apertura.

#### 2.2.1.2 Ventilazione a flusso incrociato (Cross ventilation<sup>9</sup>)

La ventilazione a flusso incrociato è una strategia di raffrescamento ventilativo in cui l'aria attraversa l'edificio grazie alla presenza di aperture su fronti opposti (o comunque diversamente orientati), sfruttando principalmente le differenze di pressione indotte dal vento e, in misura variabile, l'effetto di galleggiamento. Rispetto alla ventilazione monolaterale, la cross-ventilation può incrementare sensibilmente le portate d'aria e quindi la capacità di rimozione del calore interno, con ricadute dirette su comfort e domanda energetica. Può costituire una misura di raffrescamento passivo particolarmente efficace quando è presente una sufficiente "finestra climatica" notturna (temperature esterne inferiori a quelle interne) e un regime eolico favorevole (Figura 2.9).



9. Dalla UNI CEN/TR 16798-4:2018: La ventilazione trasversale è una ventilazione naturale indotta dalle differenze di pressione del vento sull'involucro edilizio. Sul lato sopravvento dell'edificio la pressione è relativamente alta, mentre la pressione sul lato sottovento dell'edificio e sui tetti bassi è relativamente bassa. Di norma, la ventilazione trasversale sarà efficace quando la profondità della stanza non è superiore a 5 volte l'altezza della stanza. Con tempo calmo non ci sarà alcuna forza motrice per la ventilazione.

*Figura 2.9 La Robie House (1909) di Frank Lloyd Wright a Chicago presenta intere pareti di porte e finestre apribili per la ventilazione trasversale. Dispone inoltre di ampi aggetti di copertura per proteggere dal sole e dalla pioggia. Fonte: Norbert Lechner, Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects, 4ª ed., John Wiley & Sons, 2015, cap. 10, p. 308*

Un'evidenza quantitativa utile è fornita dallo studio su edificio per uffici condotto in Croazia, che confronta una località continentale e una marittimo-mediterranea (Split): durante il periodo di raffrescamento, la temperatura media esterna notturna (20:00–07:00) risulta pari a 18,8 °C e la velocità media del vento notturno a 3,21 m/s, condizioni che supportano l'attivazione del flusso attraversante per lo smaltimento del calore accumulato.

Nello stesso lavoro, l'implementazione del raffrescamento notturno mediante cross-ventilation porta a una riduzione della domanda annua di energia di raffrescamento del 32,2% nella località mediterranea e a una contrazione del periodo con necessità di raffrescamento artificiale del 34%, indicando che il beneficio non si limita alla riduzione dei picchi giornalieri ma modifica anche la durata stagionale del ricorso alla climatizzazione (Veršić et al., 2022). Tali risultati confermano che, in contesti mediterranei costieri, la cross-ventilation può agire come dissipatore “gratuito” soprattutto nelle ore non occupate, mediante la rimozione del calore dal volume d'aria e lo scarico termico della massa interna. In un caso studio su appartamento residenziale a Beirut, l'ottimizzazione congiunta di involucro e strategia di gestione ibrida NV+HVAC (che considera anche l'interconnessione tra zone e quindi la possibilità di flussi incrociati interni) ha prodotto risparmi energetici del 22% e un incremento di circa 20% delle ore annuali di ventilazione naturale, riducendo la dipendenza dall'impianto nelle condizioni favorevoli (Yeretzian & Karam, 2023).

Su edifici scolastici in diverse zone mediterranee, inoltre, la prestazione energetica dei regimi di ventilazione naturale risulta sensibile a variabili progettuali tipiche della cross-ventilation (orientamento e gestione delle aperture): l'orientamento sud, in edifici naturalmente ventilati, può ridurre la domanda HVAC fino al 42%, evidenziando come il potenziale di raffrescamento ventilativo sia fortemente legato all'integrazione tra ventilazione e controllo dei guadagni (Maiques et al., 2025). La determinazione delle portate nella ventilazione trasversale può essere effettuata in conformità alla (UNI EN 16798-7, 2018) che definisce i metodi di calcolo della cross-ventilation. In tale ambito, un parametro di particolare rilevanza è l'area equivalente trasversale, la cui valutazione avviene mediante la combinazione delle superfici delle aperture opportunamente orientate, secondo le procedure indicate nelle equazioni di riferimento della norma.

$$q_{V,arg,in} = 3600 \frac{\rho_{a,ref}}{\rho_{a,e}} \max \left( C_{D,w} A_{w,cross} \min(u_{10,site}, u_{10,site,max}) (\Delta C_p)^{0,5} ; \frac{A_{w,tot}}{2} (C_{st} h_{w,st} |T_z - T_e|)^{0,5} \right)$$

### 2.2.1.3 Ventilazione a flusso misto

La ventilazione a flusso misto (*mixed-mode ventilation*) è una strategia ibrida che combina ventilazione naturale e sistemi meccanici, sfruttando prioritariamente le forze motrici ambientali – vento ed effetto di galleggiamento – e attivando il supporto impiantistico solo quando le condizioni esterne non risultano sufficienti. Il funzionamento si basa su logiche di controllo adattivo che regolano dinamicamente aperture dell'involucro e dispositivi meccanici, consentendo di massimizzare il free-cooling e ridurre il ricorso continuo ai sistemi HVAC. L'efficacia del sistema dipende dalla corretta integrazione tra configurazione architettonica, progettazione delle aperture e strategie di controllo (Peng et al., 2022; Tognon et al., 2023).

La letteratura scientifica recente documenta in modo consistente i benefici energetici di tale approccio: studi sperimentali su edifici residenziali evidenziano riduzioni dei consumi HVAC comprese tra il 24 % e il 27 % durante le stagioni intermedie, attribuibili allo sfruttamento del free-cooling mediante aperture operabili (Do & Cetin, 2022). Analogamente, ricerche condotte su edifici scolastici riportano risparmi energetici complessivi variabili tra il 20 % e il 60 %, in funzione delle condizioni climatiche e delle strategie di controllo adottate (Otoo et al., 2024).

In contesti climatici caldi, l'integrazione tra ventilazione naturale e assistenza meccanica si è dimostrata efficace nel contenimento della domanda di raffrescamento, con riduzioni dei consumi estivi comprese tra il 14 % e il 38 % rispetto a edifici climatizzati convenzionalmente (Lee et al., 2025). Ulteriori evidenze empiriche indicano che i benefici energetici si estendono anche alla scala annuale, con diminuzioni del consumo energetico complessivo dell'ordine del 23 % e parallele riduzioni delle emissioni climalteranti (Niyadi & Elnabawi, 2025). Tali risultati confermano che la ventilazione a flusso misto non rappresenta unicamente una soluzione tecnologica ibrida, ma un paradigma di gestione climatica dell'edificio fondato sulla modulazione adattiva dei flussi d'aria e sull'interazione controllata tra ambiente esterno e sistema edilizio.

### 2.2.1.4 Raffrescamento ventilato notturno<sup>10</sup>

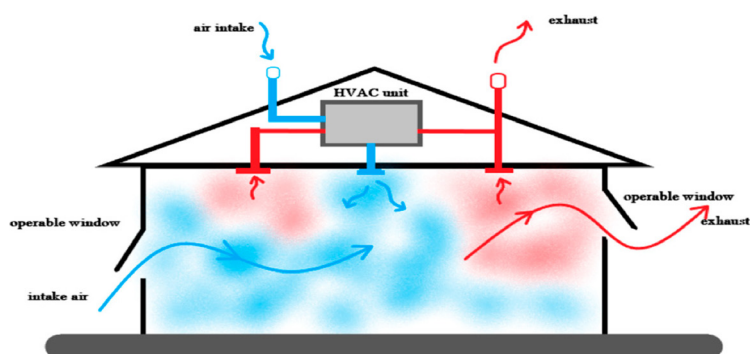
Il raffrescamento ventilato notturno (*night-time ventilative cooling / night purge*) è una strategia che sfrutta l'aria esterna più fresca nelle ore notturne per dissipare il calore accumulato e soprattutto per "ricaricare" di freddo la massa termica interna, riducendo i carichi

10. Dalla UNI CEN/TR 16798-4:2018: Durante il periodo estivo, quando la capacità di raffreddamento dell'aria esterna è massima di notte, la ventilazione naturale può rimuovere efficacemente il calore eccessivo accumulato dall'edificio (raffrescamento notturno dell'edificio) in modo che il livello di temperatura nell'edificio durante il giorno possa essere mantenuto entro i limiti di comfort o che la necessità di raffreddamento sia ridotta considerevolmente. Ciò è, tuttavia, subordinato alla presenza di strutture pesanti esposte e di elevati tassi di ricambio dell'aria ( $>4-6 \text{ h}^{-1}$ ).

di raffrescamento nelle ore diurne successive (Figura 2.9). L'effetto di raffreddamento della ventilazione diretta sulla riduzione dei carichi di raffreddamento dipende da tre parametri principali: la differenza tra le temperature interna ed esterna (principalmente durante la notte), la portata d'aria e la massa termica dell'edificio (Campaniço et al., 2014). L'efficacia delle tecniche di ventilazione notturna sulla riduzione dei carichi di raffreddamento di un edificio è stata dimostrata in diversi studi. Il potenziale di raffrescamento della ventilazione notturna nella stagione estiva per ridurre l'uso di energia per il comfort termico è stato dimostrato da diversi autori per i climi europei, suggerendo che il raffrescamento passivo tramite la ventilazione naturale indotta dal vento può svolgere un ruolo importante in questo senso. In effetti, il controllo delle aree di apertura delle finestre e dei periodi di ventilazione in base alle condizioni interne ed esterne sono stati segnalati come strategie efficienti per minimizzare il disagio da surriscaldamento nel contesto climatico mediterraneo (Duarte, 2019b).

*Figura 2.10* Schema del funzionamento della ventilazione naturale e ibrida con raffrescamento ventilato notturno.

Fonte: Otoo, C., Lu, T., & Lü, X. (2024). *Application of Mixed-Mode Ventilation to Enhance Indoor Air Quality and Energy Efficiency in School Buildings*. *Energies*, 17(23), 6097. MDPI. <https://doi.org/10.3390/en17236097>



In un caso studio residenziale simulato per Xi'an, la ventilazione notturna ha ridotto il tempo di funzionamento del condizionamento di circa 2,5 h in una giornata con escursione di 3 °C, arrivando fino a 10,58 h quando l'escursione è 15 °C; coerentemente, la riduzione della energia giornaliera è risultata pari a 1,76 kWh (escursione 3 °C) e 4,85 kWh (escursione 15 °C), con una diminuzione dei costi di esercizio del raffrescamento che, nel confronto tra 15 °C e 3 °C, raggiunge circa il 63,7%. Nello stesso studio si evidenzia inoltre una soglia climatica operativa: quando la variazione termica tipica estiva supera 6 °C, la ventilazione notturna risulta applicabile per 76 giorni nel trimestre estivo considerato (circa 82,6% del periodo), indicando un potenziale di utilizzo significativo in climi con adeguata escursione (Xiang & Li, 2024).

Su scala prestazionale, modelli recenti che valutano il raffresca-



mento notturno della massa interna riportano riduzioni importanti anche in termini di carichi: in condizioni ottimali (massa interna accoppiata a involucro leggero) la riduzione del picco di carico di raffrescamento può raggiungere 35,9%, mentre il beneficio annuale può arrivare fino a 6,67 kWh/m<sup>2</sup>·anno di domanda di raffrescamento evitata in specifiche condizioni climatiche (Li et al., 2025). Studi mirati sul comportamento termo-fluidodinamico e sull'ottimizzazione del sistema evidenziano inoltre che l'efficacia non è solo funzione della portata d'aria, ma anche della distribuzione del moto convettivo e dei coefficienti di scambio: per un ufficio climatizzato, l'ottimizzazione della strategia di night cooling ha prodotto risparmi fino a 29,0% dell'energia di raffrescamento (in termini di total cooling energy per unit floor area), mantenendo livelli di comfort accettabili (R. Guo et al., 2020).

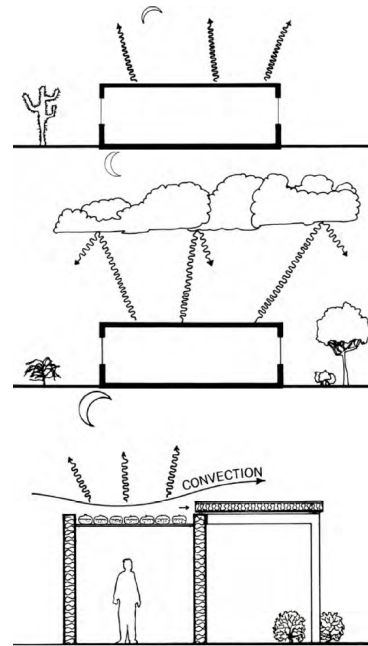
Infine, applicazioni su edifici nZEB in clima temperato indicano che la ventilazione notturna viene spesso modellata con portate dell'ordine di 3 ACH nelle ore notturne, confermando come la prestazione dipenda dalla corretta definizione di finestre/serramenti, orari e soglie di attivazione oltre che dal contesto microclimatico (Amari-padath et al., 2023).

Pertanto, il raffrescamento ventilato notturno è un metodo molto efficace per ridurre la richiesta di aria condizionata per gli edifici per uffici e migliorare il comfort termico durante il giorno, indipendentemente dalle condizioni climatiche. Per aumentare le prestazioni di raffreddamento della ventilazione notturna e garantire che l'apertura delle finestre richiesta venga eseguita regolarmente, la strategia di ventilazione notturna dovrebbe essere integrata nel sistema di gestione energetica degli edifici per uffici e nel controllo, se applicabile (Santamouris & Kolokotsa, 2013).

### 2.2.2 Raffrescamento radiante

Il raffrescamento radiativo è una tecnica passiva che consente alle superfici edilizie di dissipare calore verso il cielo notturno, sfruttando l'emissione di radiazione infrarossa, in particolare nella finestra atmosferica 8–13 μm (Liang et al., 2023). Superfici ad alta emissività, come tetti o pannelli speciali, possono raffreddarsi anche sotto la temperatura dell'aria esterna in notti serene e asciutte (Lechner, 2009). Sistemi come i "cool roof"<sup>11</sup> radiativi o i tetti blu mostrano significative riduzioni delle temperature e dei consumi energetici (Al-Obaidi et al., 2014; Jeon & Yoo, 2024). L'efficacia della tecnica dipende fortemente dalle condizioni atmosferiche: nubi e umidità riducono la trasparenza infrarossa e limitano il raffrescamento,

11. Il materiale emette il proprio calore sotto forma di radiazione infrarossa a onde lunghe (LWIR), sfruttando una "finestra atmosferica". In questo intervallo (8–13 μm), l'atmosfera terrestre è relativamente trasparente, permettendo a questa radiazione di uscire verso lo spazio (Nqoro et al., 2025).

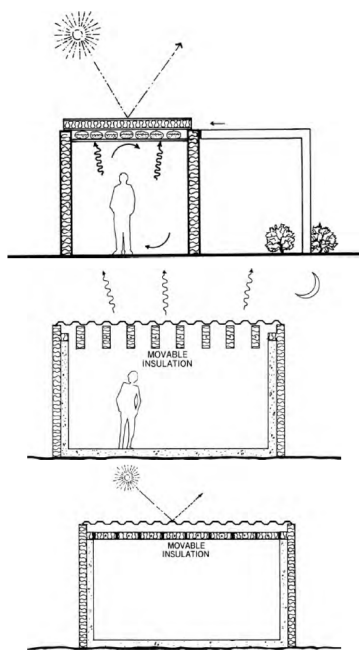


*Figura 2.11 Nelle notti serene con bassa umidità si verifica un forte raffreddamento radiativo verso il cielo notturno freddo (spazio esterno).*

*Figura 2.12 L'umidità riduce il raffreddamento radiativo e le nuvole lo bloccano quasi completamente.*

*Figura 2.13 Durante una notte estiva, l'isolamento viene rimosso e i sacchi d'acqua cedono il loro calore per raffreddamento radiativo.*

*Fonte: Norbert Lechner, Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects, 4ª ed., John Wiley & Sons, 2015, cap. 10, p. 314*



**Figura 2.14** Durante una giornata estiva, i sacchi d'acqua sono isolati dal sole e dall'aria esterna calda, mentre agiscono come massa di accumulo (heat sink) per lo spazio sottostante.

**Figura 2.15** Di notte, l'isolamento mobile è in posizione aperta così che il calore dell'edificio possa essere irradiato verso l'esterno. Questo è un esempio di raffreddamento radiativo diretto.

**Figura 2.16** Durante il giorno, l'isolamento è in posizione chiusa per mantenere il calore all'esterno. La massa interna raffreddata agisce ora come accumulatore di calore.

Fonte: Norbert Lechner, *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*, 4ª ed., John Wiley & Sons, 2015, cap. 10, p. 315

rendendolo più adatto a climi secchi con cieli limpidi (Kamal, 2012; Liang et al., 2023). La strategia può essere applicata in modo diretto (*Figura 2.11-2.12-2.13*), quando le superfici edilizie irradiano calore direttamente verso il cielo, oppure in modo indiretto (*Figura 2.14-2.15-2.16*), come nel caso dei tetti “blu” in cui uno strato d'acqua viene raffreddato durante la notte e impiegato come serbatoio termico durante il giorno.

I cool roof rappresentano una strategia passiva di controllo dei guadagni termici estivi basata sull'aumento della riflettanza solare (SR) e dell'emissività termica ( $\epsilon$ ) delle coperture. Riducendo l'assorbimento della radiazione incidente, tali superfici limitano il surriscaldamento e i flussi termici verso gli ambienti interni. Le applicazioni analizzate mostrano che materiali ad alte prestazioni possono determinare riduzioni della temperatura superficiale dell'ordine di 10–20 °C rispetto a coperture tradizionali scure. Le verniciature chiare raggiungono valori di SR fino a 0,80–0,90, mentre le membrane polimeriche chiare presentano SR > 0,70 ed  $\epsilon$  > 0,90, configurandosi come soluzioni particolarmente efficaci. L'efficacia dell'intervento dipende dalla tipologia edilizia e dal contesto climatico, risultando più rilevante negli edifici bassi e nei climi ad elevata radiazione solare. Nei contesti vincolati, l'impiego di “cool colors” consente di incrementare la riflettanza senza alterare significativamente l'aspetto cromatico, con valori che possono aumentare da 0,04–0,18 (materiali standard) a 0,41–0,66 (materiali cool) (D'Olimpio, 2023).

Nel contesto mediterraneo, dove in estate ricorrono frequentemente cieli sereni e un'elevata radiazione solare, la letteratura recente quantifica un potenziale di raffrescamento radiativo particolarmente elevato. Una mappatura europea basata su modello spettrale di passive daytime radiative cooling (PDRC) stima che le aree attorno al bacino del Mediterraneo presentino il massimo potenziale, con un possibile cooling energy saving che supera 180 kWh/m<sup>2</sup>-anno (Yang et al., 2024). A scala edificio, simulazioni dinamiche condotte su residenze in città mediterranee (tra cui Atene, Milano e Marsiglia) mostrano che l'impiego di coperture PDRC può determinare riduzioni della temperatura superficiale del tetto fino a 30 °C e, nel caso di un edificio scarsamente isolato in clima caldo (Atene), una riduzione del fabbisogno di energia per raffrescamento fino al 75%. Tuttavia, lo stesso studio evidenzia trade-off stagionali: l'aumento della dispersione radiativa in inverno può incrementare la domanda di riscaldamento (fino a +24% nel caso analizzato), portando a un risparmio complessivo più contenuto (~5,4% di energia primaria), e rendendo cruciale l'integrazione con adeguati livelli di iso-

lamento. Dal punto di vista della durabilità, viene inoltre stimato che l'invecchiamento del materiale possa aumentare le temperature superficiali medie di circa +3 °C dopo 5 anni e +6 °C dopo 10 anni, indicando la necessità di considerare la degradazione prestazionale nelle valutazioni energetiche di lungo periodo (De Masi et al., 2026).

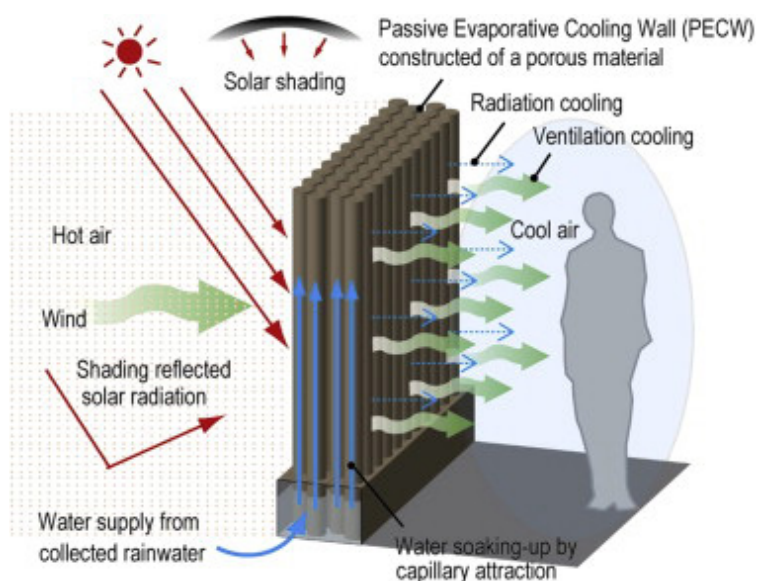
Oltre alle applicazioni dirette sulle coperture, le configurazioni indirette di raffrescamento radiativo possono influenzare significativamente il microclima degli spazi esterni e il comportamento energetico degli ambienti limitrofi. In un caso studio relativo a un cortile in clima mediterraneo, l'adozione di strategie radiative ha determinato una riduzione delle temperature operative nel periodo caldo, con intervalli compresi tra 18,33–33,78 °C, rispetto ai 19,32–38,00 °C dello scenario di riferimento. Tale modifica del campo termico ha comportato una diminuzione dei carichi termici degli ambienti adiacenti necessaria al raggiungimento delle condizioni di comfort, quantificata tra 63,46 % e 69,85 %, evidenziando un beneficio congiunto sul comfort outdoor e sulla domanda energetica indoor (Domínguez-Torres & Domínguez-Delgado, 2024). In condizioni atmosferiche favorevoli, caratterizzate da bassa umidità e cielo sereno, sperimentazioni su pannelli radiativi a circolazione d'acqua hanno mostrato potenze medie di raffrescamento pari a 30–45 W/m<sup>2</sup> e riduzioni di temperatura sub-ambient fino a 2,8 °C, confermando la rilevanza del cielo quale efficace dissipatore radiativo (Aketouane et al., 2022).

Nel settore non residenziale dei climi mediterranei, l'impiego di superfici di involucro ad alta riflettanza solare e alta emissività infrarossa, assimilabili a coperture cool roof con comportamento radiativo, evidenzia impatti energetici apprezzabili. Simulazioni annuali condotte su uno stock di edifici per uffici in Spagna indicano una riduzione potenziale della domanda di raffrescamento di circa il 25 %, con effetti più marcati nelle aree climatiche più calde. In particolare, nel clima Csa, la contrazione dei consumi si colloca nell'intervallo 3,5–37,4 kWh/m<sup>2</sup>·anno, a seconda delle caratteristiche tipologiche degli edifici analizzati (Rincón et al., 2024).

### 2.2.3 Raffrescamento evaporativo

Il raffrescamento evaporativo rappresenta una delle più rilevanti strategie di raffrescamento passivo e a bassa energia nei climi mediterranei e caldo-secchi, grazie alla sua capacità di sfruttare i processi di scambio di calore latente associati all'evaporazione dell'acqua (Haile et al., 2024; Tucci, 2020). Il principio fisico alla base della tec-

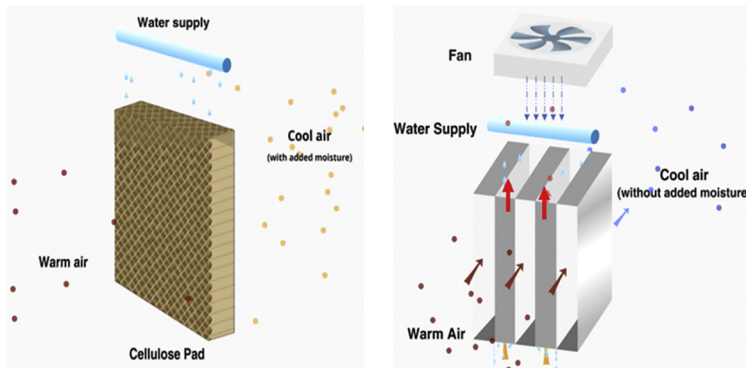
*Figura 2.17* Schema di funzionamento di una Parete di Raffrescamento Evaporativo Passivo (Passive Evaporative Cooling Wall, PECW). Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230900170X>



nica consiste nella riduzione della temperatura dell'aria mediante assorbimento di calore sensibile durante il passaggio di fase dell'acqua, consentendo di ottenere effetti di raffreddamento significativi con un fabbisogno energetico nettamente inferiore rispetto ai sistemi frigoriferi convenzionali (Figura 2.17).

Tali sistemi si distinguono in raffrescamento evaporativo diretto (Figura 2.18), in cui l'aria raffreddata e umidificata viene immessa direttamente negli ambienti interni, e raffrescamento evaporativo indiretto (Figura 2.19), in cui il processo evaporativo avviene su un flusso separato o su un fluido termovettore, consentendo di ridurre la temperatura senza incrementare l'umidità dell'aria indoor (Campaniço et al., 2014; Givoni, 1994; Sajjad et al., 2021).

I sistemi evaporativi risultano particolarmente efficaci nei climi caldi e secchi e trovano applicazione sia in soluzioni vernacolari, come le torri del vento descritte da Bahadori (1978), sia in dispositivi contemporanei a bassa richiesta energetica (Bahadori, 1978; Gupta & Tiwari, 2016; Laurini et al., 2016). La letteratura scientifica recente conferma che tali sistemi possono garantire elevate efficienze di raffreddamento, con valori di efficacia che, nelle configurazioni più evolute e multistadio, possono raggiungere fino al 95%, indicando la capacità di avvicinarsi alla temperatura di bulbo umido dell'aria esterna. Dal punto di vista energetico, i consumi elettrici risultano tipicamente limitati ai ventilatori e ai dispositivi di circolazione dell'acqua, con potenze specifiche dell'ordine di 0,3–1,2 kW



*Figura 2.18 Principi di funzionamento del raffreddamento evaporativo diretto (DEC), l'aria calda attraversa un mezzo poroso umidificato (es. pannello in cellulosa), subendo una riduzione di temperatura associata all'evaporazione dell'acqua e un aumento del contenuto di umidità. Fonte: Sajjad et al., 2021.*

*Figura 2.19 Principi di funzionamento del raffreddamento evaporativo indiretto (IEC), il raffreddamento dell'aria avviene mediante scambio termico attraverso una superficie di separazione, evitando il trasferimento diretto di umidità al flusso d'aria di mandata. Fonte: Sajjad et al., 2021.*

per tonnellata di raffreddamento, valori significativamente inferiori a quelli richiesti dai cicli a compressione di vapore. In termini di efficienza globale, sono riportati Coefficienti di Prestazione (COP) fino a circa 35, evidenziando un potenziale di risparmio energetico sostanziale rispetto alle tecnologie di climatizzazione tradizionali (Haile et al., 2024). Tuttavia, la sua efficacia risulta fortemente dipendente dalle condizioni di umidità relativa e richiede un'attenta valutazione degli effetti sull'ambiente indoor (Buono, 1998; Jomehzadeh et al., 2020). Al contrario, in condizioni di elevata umidità relativa, la capacità di raffreddamento si riduce progressivamente, limitando l'efficienza complessiva del processo (Xia et al., 2026). Evidenze sperimentali recenti dimostrano che, in condizioni mediterranee caldo-seccche, tali sistemi possono produrre significativi benefici termo-energetici: in un caso studio su ambienti scolastici in Spagna meridionale, l'applicazione del raffreddamento evaporativo ha comportato una riduzione delle ore di surriscaldamento fino al 26% e diminuzioni di temperatura interna fino a 6 °C, contribuendo al mantenimento delle condizioni di comfort con un impiego energetico contenuto (Aruta et al., 2026). Parallelamente, tecnologie evaporative avanzate mostrano prestazioni energetiche estremamente favorevoli: sistemi indiretti rigenerativi presentano valori di Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) fino a 5,5 in località mediterranee, mentre configurazioni a punto di rugiada riportano efficacia fino a 0,87 e coefficienti di prestazione (COP) ampiamente superiori ai sistemi meccanici tradizionali (Comino et al., 2022; Romero-Lara et al., 2023). Un ulteriore aspetto di rilievo riguarda i benefici ambientali associati alla tecnologia. L'assenza di refrigeranti sintetici elimina il rischio di emissioni di gas climalteranti e riduce l'impatto ambientale diretto dei sistemi di raffreddamento. Inoltre,



**Figura 2.20** Schema concettuale del sistema di raffrescamento evaporativo in facciata (a); Installazione del sistema evaporativo in terracotta presso l'edificio DEKI Electronics, Nuova Delhi (b); Dettaglio costruttivo degli elementi ceramici del sistema di raffrescamento evaporativo (c); Funzionamento del sistema evaporativo mediante bagnatura degli elementi ceramici (d). Fonte: <https://www.bu-ildnews.it/articolo/raffreddamento-evaporativo-in-facciata>

2.20 b



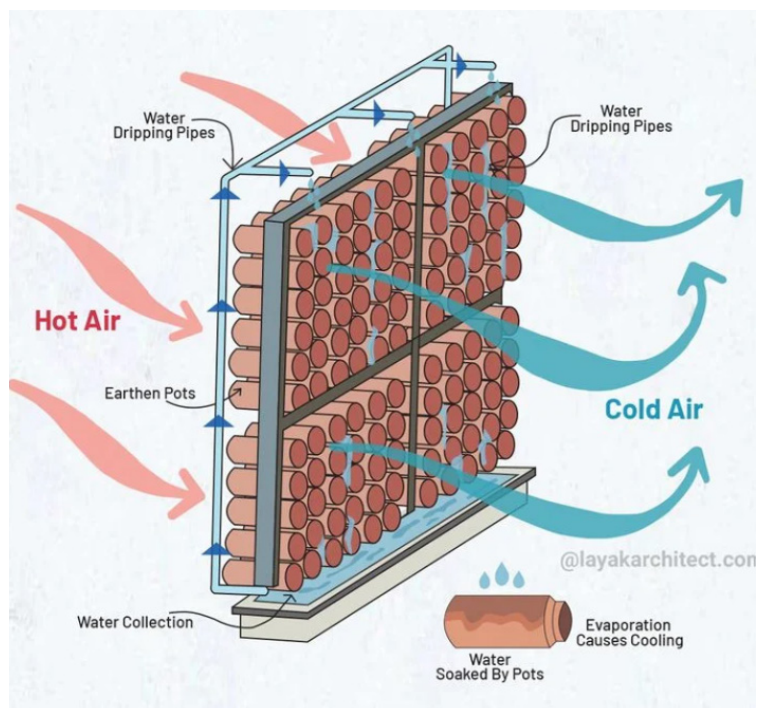
2.20 c



2.20 d



la minore domanda di energia elettrica contribuisce indirettamente alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> legate alla produzione energetica, rafforzando il ruolo del raffrescamento evaporativo nelle strategie di sostenibilità energetica degli edifici (Haile et al., 2024; Ishugah et al., 2024). Tali risultati confermano che il raffrescamento evaporativo, se correttamente integrato nelle strategie di ventilazione e controllo igrometrico, può contribuire in modo sostanziale alla riduzione della domanda energetica per raffrescamento negli edifici del terziario mediterraneo. Un'applicazione significativa del raffrescamento evaporativo in facciata è rappresentata dall'intervento realizzato in India dallo studio Ant Studio sull'edificio DEKI Electronics di Nuova Delhi (Figura 2.20). Il sistema consiste in una facciata secondaria composta da tubi in terracotta disposti a nido d'ape, attraversati da acqua durante le ore più calde. L'evaporazione progressiva dell'acqua consente l'assorbimento di calore sensibile dall'aria esterna, determinando una riduzione della temperatura dell'aria prossima all'involucro; secondo i progettisti, tale configurazione può abbassare le temperature locali da valori superiori ai 50 °C a circa 36 °C (Seghetti, 2017). Oltre all'effetto di raffrescamento, la soluzione opera come schermatura solare attiva, integrando



controllo climatico passivo e funzione architettonica. Il caso evidenzia il potenziale del raffrescamento evaporativo quale strategia integrata nell'involucro edilizio, con possibili benefici in termini di riduzione dei carichi termici e dei consumi energetici negli edifici situati in climi caldi.

#### 2.2.3.1 Raffrescamento evaporativo diretto

Il raffreddamento evaporativo diretto (Direct Evaporative Cooling, DEC) consiste nell'immissione negli ambienti interni di aria raffreddata mediante contatto diretto con acqua in evaporazione. Il processo si basa sull'assorbimento di calore latente durante il cambiamento di stato dell'acqua, che determina una riduzione della temperatura di bulbo secco dell'aria e un contestuale aumento del contenuto di umidità. Dal punto di vista termodinamico, il raffrescamento evaporativo diretto è un processo adiabatico, caratterizzato da entalpia pressoché costante: l'energia sensibile diminuisce mentre l'umidità assoluta aumenta (Givoni, 1994; Nguyen & Reiter, 2014; Sajjad et al., 2021). Operativamente, l'aria attraversa superfici bagnate o materiali porosi, tipicamente pannelli in cellulosa o elementi ceramici, favorendo l'evaporazione e il conseguente raffreddamento del flusso d'aria. L'efficacia del DEC dipende fortemente dalle condizioni psicrometriche esterne. In climi caldi e secchi o mediterranei con umidità moderata, il sistema può garantire miglioramenti significativi del comfort termo-igrometrico, mentre risulta meno efficiente in contesti umidi, dove l'aria è prossima alla saturazione. Studi recenti indicano che, in condizioni climatiche mediterranee, portate di ventilazione adeguate ( $\geq 12,5$  L/s-persona) consentono di limitare efficacemente il surriscaldamento, mantenendo le ore di discomfort inferiori all'1%, pur richiedendo incrementi di portata negli scenari futuri più caldi (Aruta et al., 2025). Le prestazioni tipiche dei sistemi DEC mostrano efficienze comprese tra l'80% e il 90%, con riduzioni di temperatura dell'aria dell'ordine di 6–8 °C e incrementi di umidità che possono raggiungere circa il 30% (Nguyen & Reiter, 2014).

In funzione del grado di meccanizzazione, i sistemi evaporativi diretti possono essere distinti in:

- configurazioni passive, che sfruttano la ventilazione naturale (es. torri o pareti evaporative);
- configurazioni ibride o parzialmente passive, che impiegano ventilatori a bassa potenza;
- configurazioni attive, come gli swamp coolers, dotate di pompe di ricircolo e ventole.

Nonostante la semplicità costruttiva, i costi contenuti e l'assenza di refrigeranti, il DEC presenta alcune criticità operative, tra cui il controllo dell'umidità interna, la manutenzione delle superfici bagnate e i potenziali rischi igienico-sanitari in assenza di adeguata ventilazione (Nguyen & Reiter, 2014; Sajjad et al., 2021). Applicazioni reali documentano l'efficacia della tecnologia in climi molto caldi, come in India, dove tali sistemi sono utilizzati anche negli edifici per uffici, spesso integrati con strategie di ventilazione naturale o ibrida (Tewari et al., 2019).

Nel complesso, il raffrescamento evaporativo diretto rappresenta una soluzione a basso consumo energetico per il comfort estivo, la cui efficacia dipende tuttavia dall'accurata integrazione con le condizioni climatiche locali e con le strategie di gestione dell'aria interna (Campaniço et al., 2014; Santamouris & Kolokotsa, 2013).

#### 2.2.3.2 Raffrescamento evaporativo indiretto

Il raffrescamento evaporativo indiretto (Indirect Evaporative Cooling, IEC) si basa sul medesimo principio fisico del raffrescamento diretto, l'evaporazione dell'acqua, ma disaccoppia il processo evaporativo dal flusso d'aria destinato agli ambienti interni. Il raffreddamento avviene infatti per scambio sensibile attraverso uno scambiatore di calore o una superficie di separazione, evitando l'incremento dell'umidità specifica dell'aria immessa e superando i limiti tipici dei sistemi DEC nei contesti igrometricamente critici (Chen et al., 2016; Givoni, 2011). Nel sistema IEC, l'evaporazione interessa un flusso d'aria secondario, che sottrae calore al flusso primario senza trasferimento diretto di vapore, consentendo di ottenere temperature di mandata inferiori e condizioni indoor più stabili. Le ricerche più recenti evidenziano prestazioni energetiche particolarmente favorevoli. Tecnologie avanzate come i sistemi dew-point indirect evaporative cooling (DIEC) mostrano valori di efficacia fino a 0,87 e Coefficienti di Prestazione (COP) superiori a 50 in specifiche condizioni operative (Comino et al., 2022). Su scala stagionale, configurazioni rigenerative indirette (RIEC) raggiungono SEER fino a 5,5, confermando l'elevata efficienza energetica della tecnologia e la sua idoneità per il trattamento dell'aria primaria negli edifici non-residenziali (Romero-Lara et al., 2023). Tali caratteristiche rendono il raffrescamento evaporativo indiretto particolarmente adatto agli edifici per uffici, dove il controllo igrometrico, la qualità dell'aria e la stabilità delle condizioni termo-ambientali costituiscono requisiti prioritari. L'evoluzione tecnologica degli ultimi anni ha portato allo sviluppo di configurazioni ad alte prestazioni, tra cui il ciclo a



punto di rugiada e il ciclo Maisotsenko (M-cycle), che consentono di incrementare l'efficacia di raffreddamento e ampliare il campo di applicabilità climatica (Amer et al., 2015; Sajjad et al., 2021). Rispetto ai sistemi DEC, i dispositivi IEC mostrano generalmente maggiore efficacia di raffrescamento e minori consumi energetici, risultando particolarmente vantaggiosi nei climi caldi e secchi o mediterranei con umidità moderata (Chen et al., 2016). Dal punto di vista applicativo, i sistemi IEC possono essere integrati con uno stadio successivo di raffrescamento diretto, dando origine a configurazioni a doppio stadio (Two-Stage Evaporative Cooling, TSEC). In tali sistemi, l'aria viene inizialmente raffreddata per via indiretta e successivamente ulteriormente raffreddata mediante evaporazione diretta, combinando stabilità igrometrica ed elevata capacità di raffreddamento (Tewari et al., 2019). Parallelamente alle soluzioni impiantistiche, la letteratura documenta anche strategie di raffrescamento evaporativo indiretto passivo integrate nell'involucro edilizio. In tali configurazioni, l'evaporazione interessa superfici esterne dell'edificio, come pareti o coperture, che si raffreddano e agiscono come dissipatori termici, sottraendo calore agli ambienti interni per conduzione e irraggiamento. Questo approccio consente di ridurre le temperature radianti e dell'aria interna senza alterare l'umidità indoor, migliorando il comfort termo-igrometrico complessivo (Givoni, 2011). Un'ulteriore variante prevede il raffreddamento evaporativo notturno di volumi d'acqua, successivamente impiegati durante il giorno come serbatoi di freddo tramite scambiatori di calore.

## 2.2.4 Raffrescamento geotermico

Tra i sistemi di raffrescamento passivo assumono particolare rilevanza quelli accoppiati al terreno, in quanto sfruttano l'inerzia e la stabilità termica del suolo (Annan & Nehme, 2016) come dissipatore naturale di calore (Tucci, 2020). A determinate profondità, infatti, il terreno mantiene una temperatura pressoché costante, prossima alla media annua dell'aria esterna, permettendo l'assorbimento del calore per conduzione dalle strutture edilizie con cui è in contatto (Kamal, 2012; Santamouris & Kolokotsa, 2013; Annan & Nehme, 2016). Sistemi quali gli scambiatori aria-terra noti anche come Earth-Air Heat Exchangers (EAHE) (Sehli, 2022; Souliotis, 2021) o condotti interrati e i labirinti termici (Marmion et al., 2012; Rim et al., 2018; S. Song et al., 2014; S.-Y. Song et al., 2012) consentono il preraffreddamento dell'aria di ventilazione prima della sua immissione negli ambienti interni.

#### 2.2.4.1 Scambiatori di calore terra-aria

Gli scambiatori di calore terra-aria (EAHE, noti anche come earth-air heat exchangers o earth-air tunnels) sono sistemi a bassa entalpia che pretrattano l'aria di ventilazione sfruttando l'inerzia termica del sottosuolo. Il loro funzionamento si basa sulla relativa stabilità della temperatura del terreno a una certa profondità, dove le variazioni sono molto più contenute rispetto a quelle dell'aria esterna e si manifestano con uno sfasamento temporale. In modalità estiva l'aria calda cede calore al suolo, mentre in inverno l'aria fredda ne assorbe (Figura 2.21). L'efficacia dello scambio tende però a ridursi progressivamente lungo il condotto: superata una determinata lunghezza, ulteriori estensioni producono incrementi marginali di  $\Delta T$ , a fronte di maggiori costi di scavo e perdite di carico (Cirillo et al., 2023; Imanloozadeh & Lubitz, 2026).

Figura 2.21 Sistema a circuito aperto. Fonte: Norbert Lechner, *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*, 4<sup>a</sup> ed., John Wiley & Sons, 2015, cap. 10, p. 321.

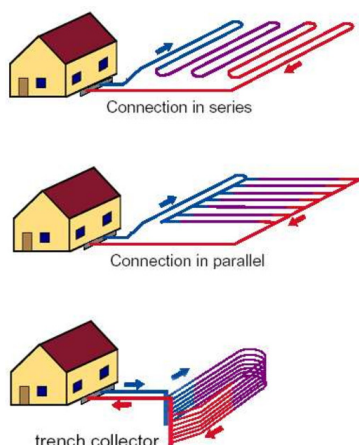
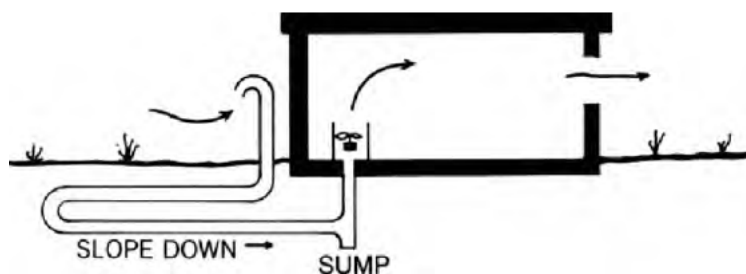


Figura 2.22 Tipologie di scambiatori di calore geotermici orizzontali: configurazione in serie, configurazione in parallelo e collettore a trincea (trench collector).

Fonte: Rawat, M., Kapoor, R., *Recent Advances in Heating and Cooling using Earth*.



La letteratura recente evidenzia che la prestazione dipende soprattutto da geometria e regime di flusso: lunghezza, profondità, diametro, velocità/portata d'aria, layout e spaziamento tra condotti, oltre a proprietà del suolo (conducibilità/umidità/stratigrafia). In particolare, studi basati su monitoraggi e analisi di sensibilità riportano che l'effetto del diametro può essere meno determinante di lunghezza/profondità/velocità entro certi range; tuttavia, ridurre il diametro a parità di portata aumenta fortemente le perdite di carico e quindi la potenza ventilante (Duarte et al., 2023).

Nelle pubblicazioni recenti, gli indicatori tecnici più utilizzati includono: temperatura di mandata e  $\Delta T$  (ingresso-uscita), potenza/capacità termica (kW, kWh/giorno), carico specifico rimosso ( $W/m^2$ ), risparmi energetici stagionali (%), perdita di carico (Pa) e potenza elettrica dei ventilatori (kW o kWh/giorno). La COP dell'EAHE, quando riportata, dipende dalla definizione adottata (spesso "utile termico/energia ventilante") (Figura 2.22) (Duarte et al., 2025).

Le configurazioni affrontate nella letteratura recente comprendono:

- Orizzontale (singolo tubo o multi-tubo in parallelo): è l'assetto

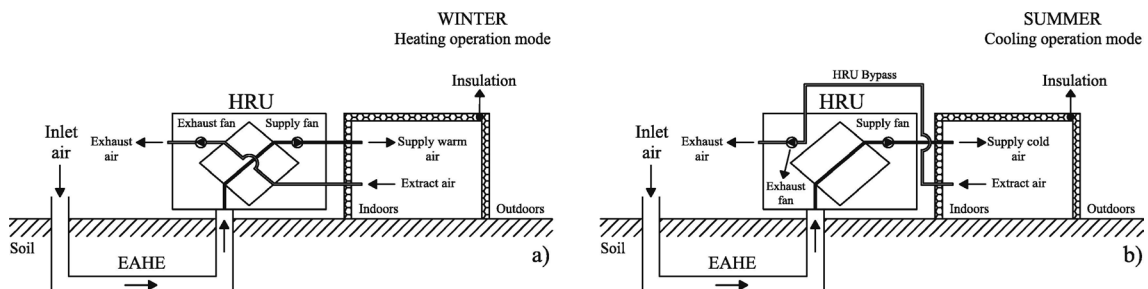
più comune per edifici, con posa a profondità di alcuni metri e layout che può essere lineare o serpentino; il dimensionamento spesso mira a massimizzare  $\Delta T$  utile evitando eccessiva perdita di carico (Duarte et al., 2023).

- Verticale/elicodale: impiegata quando l'area in pianta è limitata; la ricerca recente propone numerose ottimizzazioni termo-fluidodinamiche ma molti casi sono fuori dall'ambito specifico mediterraneo non-residenziale.
- Pipe-in-pipe (coassiale): meno frequente per aria (più tipica per fluidi), ma presente come concetto in rassegne recenti per incrementare superficie di scambio e controllare il contatto termico (Imanloozadeh & Lubitz, 2026).
- *Rock-bed*/letto di pietre: più vicino a un accumulo termico ventilato che a un "tubo nel terreno"; viene spesso confrontato con EAHE in applicazioni agricole/serre e in strategie passive, con logiche di inerzia e rigenerazione del mezzo poroso (Allali et al., 2025).

Negli edifici non-residenziali, dove i ricambi d'aria sono consistenti e le ore di funzionamento sono elevate, l'EAHE è impiegato soprattutto come stadio di pre-raffrescamento/pre-riscaldamento a monte di un'Unità di Trattamento Aria (UTA), con benefici diretti sulla potenza di batteria e sui consumi annuali. Uno studio pubblicato da Cilitto et al, 2023 sviluppa un modello agli elementi finiti bidimensionale (FEM 2D) ad alta risoluzione, descrive in modo accoppiato il dominio terreno-superficie-condotti e utilizza condizioni climatiche variabili nel tempo (Figura 2.23).

*Figura 2.23 Schema di funzionamento di un sistema integrato con scambiatore aria-terra (EAHE) e unità di recupero di calore (HRU): (a) modalità invernale, in cui l'aria esterna viene preriscaldata dal terreno e ulteriormente trattata dall'HRU; (b) modalità estiva, in cui l'aria viene preraffreddata dal suolo e l'HRU può operare in bypass per il raffrescamento.*

Fonte: *Energy and Buildings*, articolo disponibile su ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821008161>



all'interno dei tubi, contabilizzando la massa d'acqua condensata e affrontando così un aspetto spesso trascurato ma rilevante nelle applicazioni reali. Nella seconda fase dell'analisi, l'EAHE è integrato con l'unità di trattamento aria (UTA) di un edificio aziendale adibito a uffici, valutandone le prestazioni sia in regime estivo sia invernale. I risultati evidenziano risparmi energetici stagionali del sistema

HVAC integrato pari al +40,8% in raffrescamento e al +44,1% in riscaldamento. È inoltre presentata un'analisi economica sensibile alla morfologia del terreno: assumendo un costo dell'energia elettrica di 0,50 €/kWh, il tempo di ritorno semplice risulta pari a 3,3 anni in suolo tufaceo e 5,8 anni in "soft rock", con un valore attuale netto (NPV) dell'ordine di diverse centinaia di migliaia di euro (Cirillo et al., 2023).

Un contributo successivo, di , amplia l'indagine a differenti località italiane, considerando edifici per uffici situati in varie zone climatiche. L'EAHE è analizzato come sistema di pre-trattamento dell'aria, quantificandone l'impatto sui consumi dell'HVAC. Le riduzioni riportate variano tra il -30% e il -45% in riscaldamento e tra il -23% e il -43% in raffrescamento, con un valore massimo di "power saving" estivo stimato fino al +78% nel caso di Pomezia (Cirillo et al., 2024; Duarte et al., 2023).



**Figura 2.24** Sistema di scambio termico aria-terra (earth-air heat exchanger) realizzato mediante una rete di condotti sotterranei.

Fonte: AIRAH, "Faces of the Industry" (Faces 42), disponibile su: <https://www.airah100.org.au/faces-42.html>



**Figura 2.25** Sistema a labirinto in calcestruzzo per il trattamento passivo dell'aria.

Fonte: Turkish Contractors Association (TCA), Labyrinth System, disponibile su: <https://www.tmb.org.tr/en/p/606588f24e2c483e72ff8f9f/labyrinth-system>

#### 2.2.4.2 Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS)

I *Thermal Labyrinth Ventilation Systems* (TLVS) sono sistemi di pre-trattamento dell'aria esterna che sfruttano massa termica (tipicamente calcestruzzo) e spesso anche l'inerzia termica del terreno per pre-raffreddare l'aria in estate e pre-riscaldarla in inverno, prima della sua immissione negli ambienti. Il principio è affine agli *Earth-to-Air Heat Exchangers* (EAHE), ma con differenze geometriche e costruttive: nei TLVS l'aria attraversa un reticolo/labirinto (sotto l'edificio o in elementi massivi come nella *Figura 2.24*) che massimizza superficie di scambio e capacità di accumulo (Annan & Nehme, 2016; S. Song et al., 2014; S.-Y. Song et al., 2012). La letteratura disponibile mostra che, quando correttamente progettati e controllati, i TLVS possono ottenere riduzioni di temperatura dell'aria dell'ordine di alcuni °C fino a valori prossimi a 6–8 °C in configurazioni ottimizzate (ad esempio con superfici sagomate/irruvidite che aumentano turbolenza "utile" e uniformità dei flussi come nella *Figura 2.25*), con effetti potenzialmente rilevanti sul contenimento dei carichi di raffrescamento e sulla qualità del comfort in edifici non-residenziali (Rim et al., 2018).

Sul fronte operativo, emergono come critici: strategie di bypass e controllo stagionale (evitare funzionamento in periodi "neutri" o controproducenti), gestione di perdite di carico e potenza ventilatori, e soprattutto problematiche di umidità/condensa, igiene e qualità dell'aria lungo i canali (tema particolarmente sensibile in applicazioni ad alta domanda di IAQ come sanità). I TLVS interrati operano spesso con superfici a temperatura prossima a quella del terreno;

in condizioni estive umide, il raffreddamento sensibile dell'aria può spingere localmente verso la condensa (tema ampiamente discusso per gli scambiatori aria-terra in generale). La letteratura suggerisce che l'umidità può incidere sulle prestazioni e che la gestione della condensa va considerata in fase di progetto e di gestione (pendenze, drenaggi, ispezionabilità, materiali e trattamenti) (X. Guo et al., 2022; Mihalakakou et al., 2022).

Diversi studi si sono concentrati sulla simulazione e sulla valutazione dei sistemi di riscaldamento a terra di tipo tubolare (come EAHE, Earth Tube e Earth Tunnel); tuttavia, pochi si sono concentrati sul sistema a labirinto termico. Inoltre, pochi studi hanno analizzato i potenziali miglioramenti dell'efficienza di trasferimento del calore del sistema a labirinto termico e la sua effettiva modalità di funzionamento (Rim et al., 2018).

### 2.2.5 Deumidificazione con essiccante: rimozione del calore latente

La deumidificazione con essiccante è una strategia di raffrescamento passivo-ibrido che agisce sulla rimozione del calore latente, riducendo l'umidità dell'aria tramite materiali igroscopici solidi o liquidi (Givoni, 1994; Santamouris & Kolokotsa, 2013). Migliorando il comfort termoigrometrico senza intervenire direttamente sulla temperatura sensibile, il sistema risulta particolarmente efficace nei climi caldi e umidi e rientra tra i sistemi di raffrescamento indiretto (Gupta & Tiwari, 2016).

## 2.3 Conclusioni e riflessioni

Il presente capitolo ha delineato il quadro teorico e tecnologico dei sistemi di raffrescamento passivo, evidenziandone il ruolo strategico all'interno della progettazione bioclimatica contemporanea. Dall'analisi condotta emerge con chiarezza come tali sistemi non possano essere interpretati come soluzioni isolate o accessorie, bensì come componenti strutturali di un approccio progettuale integrato, fondato sull'interazione dinamica tra edificio e ambiente. Il raffrescamento passivo si configura dunque come un sistema complesso di strategie fisiche e ambientali finalizzate al controllo dei flussi di calore e alla stabilizzazione delle condizioni termo-igrometriche interne, con l'obiettivo di ridurre in modo significativo la dipendenza dalla climatizzazione meccanica.

La ricostruzione evolutiva delle tecniche passive, dalle soluzioni vernacolari alle tecnologie contemporanee, ha evidenziato una sostanziale continuità concettuale. I principi fisici alla base del raffrescamento passivo (movimento dell'aria, massa termica, scambi radiativi, processi evaporativi e accoppiamento geotermico) costituiscono invarianti teoriche che attraversano epoche e contesti culturali differenti, venendo progressivamente reinterpretate alla luce delle innovazioni tecnologiche e delle mutate esigenze prestazionali. In questo senso, l'innovazione non risiede tanto nell'introduzione di nuovi principi, quanto nella capacità di integrare e ottimizzare quelli esistenti attraverso strumenti progettuali e modelli di simulazione sempre più avanzati.

Dal punto di vista metodologico, la classificazione delle strategie passive in sistemi ventilativi, radianti, evaporativi e geotermici ha consentito di ordinare la complessità delle soluzioni disponibili e di chiarirne i meccanismi operativi e le condizioni di applicabilità.

Un aspetto particolarmente rilevante emerso dall'analisi riguarda la forte dipendenza delle prestazioni dei sistemi passivi dalle condizioni climatiche locali e dalla configurazione architettonica. L'efficacia di tali strategie non può essere generalizzata, ma richiede un'attenta calibrazione progettuale basata su dati climatici specifici e su una profonda comprensione dei fenomeni termo-fluidodinamici. In

questo contesto, gli strumenti di simulazione energetica e ambientale assumono un ruolo determinante, consentendo di valutare in fase progettuale il comportamento dell'edificio e di ottimizzare l'integrazione delle diverse strategie.

Parallelamente, emerge con evidenza la necessità di considerare il raffrescamento passivo in relazione ai sistemi attivi, all'interno di configurazioni ibride. Sebbene le strategie passive possano ridurre in modo significativo i carichi termici, esse raramente sono sufficienti, da sole, a garantire condizioni di comfort in contesti caratterizzati da climi estremi o da elevati carichi interni. L'integrazione con sistemi impiantistici ad alta efficienza consente quindi di sfruttare appieno il potenziale delle soluzioni passive, riducendo i consumi energetici e migliorando la resilienza complessiva dell'edificio. Permane tuttavia un divario tra il potenziale teorico dei sistemi di raffrescamento passivo e la loro effettiva diffusione nel settore edilizio contemporaneo. Tale scarto è riconducibile a diversi fattori, tra cui la complessità progettuale, la carenza di competenze specifiche, i vincoli normativi e la prevalenza di modelli costruttivi standardizzati. In questo scenario, appare fondamentale promuovere una maggiore integrazione tra ricerca e pratica progettuale, nonché sviluppare strumenti operativi e linee guida capaci di supportare l'applicazione sistematica di tali strategie.

Alla luce delle sfide poste dal cambiamento climatico, il raffrescamento passivo assume infine un ruolo centrale non solo in termini di efficienza energetica, ma anche come strumento di adattamento e resilienza. L'aumento delle temperature e la crescente frequenza di eventi climatici estremi rendono necessario ripensare il progetto architettonico in chiave preventiva, privilegiando soluzioni capaci di garantire condizioni di comfort con un ridotto impiego di energia. In questo contesto, i sistemi passivi, grazie alla loro capacità di sfruttare risorse naturali e di operare con un basso impatto ambientale, rappresentano una componente fondamentale delle strategie di sostenibilità.

Il raffrescamento passivo si configura non solo come un insieme di tecnologie, ma come un paradigma progettuale che implica un cambiamento profondo nell'approccio all'architettura. Da una logica reattiva, basata sull'impiego di sistemi meccanici per correggere le condizioni ambientali, si passa a una logica preventiva e integrata, in cui il progetto stesso diventa strumento di regolazione climatica. Questa transizione richiede una rinnovata consapevolezza del rapporto tra edificio, ambiente e risorse naturali, ponendo l'architettura al centro di un processo di mediazione attiva tra esigenze umane e condizioni climatiche.



## References

- Aketouane, Z., Bruneau, D., Sempey, A., Bouzoudja, R., Lagiere, P., Raji, S., & Roger, P. (2022). Development of a night-time radiative sky cooling production & storage system: A proposal for a robust sizing and potential estimation methodology. *Applied Thermal Engineering*, 211, 118378. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118378>
- Al-Azri, N., Zurigat, Y. H., & Al-Rawahi, N. (2025). Selection and Assessment of Passive Cooling Techniques for Residential Buildings in Oman Using a Bioclimatic Approach. *The Journal of Engineering Research*, 10(2), 52–68. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol10iss2pp52-68>
- Allali, F. E., Fatnassi, H., Demrati, H., Wifaya, A., & Aharoune, A. (2025). Performance assessment of sustainable cooling strategies in canarian Greenhouses: Evaluating earth-to-air heat exchanger and rock-bed systems. *Case Studies in Thermal Engineering*, 72, 106402. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106402>
- Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., & Abdul Rahman, A. M. (2014). Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. *Frontiers of Architectural Research*, 3(3), 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.06.002>
- Al-Shamkhee, D., Al-Aasam, A. B., Al-Waeli, A. H. A., Abusaibaa, G. Y., & Moria, H. (2022). Passive cooling techniques for ventilation: An updated review. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 7, 23. <https://doi.org/10.1051/rees/2022011>
- Amaripadath, D., Paolini, R., Sailor, D. J., & Attia, S. (2023). Comparative assessment of night ventilation performance in a nearly zero-energy office building during heat waves in Brussels. *Journal of Building Engineering*, 78, 107611. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107611>
- Amer, O., Boukhanouf, R., & Ibrahim, H. (2015). A Review of Evaporative Cooling Technologies. *International Journal of Environmental Science and Development*, 6, 111. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2015.V6.571>
- Annan, G. R., & Nehme, B. A. (2016). Energy Efficient Building Design Optimization Using an Underground Thermal Labyrinth. In *SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENT BUILDING DESIGN: MATERIALS AND HVAC EQUIPMENT TECHNOLOGIES* (pp. 162–167). AMER SOC HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGS.
- Aruta, G., Ascione, F., Iovane, T., & Mastellone, M. (2025). Double-skin façades for the refurbishment of historic buildings: Energy-economic feasibility for different types of glazing and ventilation rates. In *JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING* (Vol. 103). ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112125>
- Aruta, G., Escandón, R., Calama-González, C. M., Ascione, F., & Suárez, R. (2026). Is evaporative cooling an efficient solution for ensuring air quality and thermal comfort in overheated classrooms in



- a dry Mediterranean climate? *Energy and Buildings*, 350, 116660. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116660>
- Ascione, F. (2017). Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling. *Solar Energy, Solar Thermal Heating and Cooling*, 154, 34–100. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.022>
- Ascione, F., De Masi, R. F., de Rossi, F., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P. (2016). Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study. *Applied Energy*, 183, 938–957. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.027>
- Ayoobi, A. W., Ekimci, B. G., & Inceoglu, M. (2024). A Comparative Study of Sustainable Cooling Approaches: Evaluating the Performance of Natural Ventilation Strategies in Arid and Semi-Arid Regions. *Buildings*, 14(12), 3995. <https://doi.org/10.3390/buildings14123995>
- Bahadori, M. (1978). Passive Cooling Systems in Iranian Architecture. *Scientific American*. <https://doi.org/10.1038/SCIENTIFICAMERICAN0278-144>
- Bori, D. (2006). Il raffrescamento passivo degli edifici. Tecniche, tecnologie, esempi. Cenni di termofisica applicata. Sistemi Editoriali.
- Buono, M. (1998). L'architettura del vento. Soluzioni tecnologiche per il raffrescamento passivo. CLE-AN.
- Campaniço, H., Hollmuller, P., & Soares, P. M. M. (2014). Assessing energy savings in cooling demand of buildings using passive cooling systems based on ventilation. *Applied Energy*, 134, 426–438. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.053>
- Causone, F. (2016). Climatic potential for natural ventilation. In *ARCHITECTURAL SCIENCE REVIEW* (Vol. 59, Fascicolo 3, pp. 212–228). TAYLOR & FRANCIS LTD. <https://doi.org/10.1080/00038628.2015.1043722>
- Chen, Y., Yang, H., & Luo, Y. (2016). Indirect evaporative cooler considering condensation from primary air: Model development and parameter analysis. *Building and Environment*, 95, 330–345. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.030>
- Chohan, A. H., & Awad, J. (2022). Wind Catchers: An Element of Passive Ventilation in Hot, Arid and Humid Regions, a Comparative Analysis of Their Design and Function. *Sustainability*, 14(17), 11088. <https://doi.org/10.3390/su141711088>
- Cirillo, L., Greco, A., & Masselli, C. (2023). Computational investigation on daily, monthly and seasonal energy performances and economic impact through a detailed 2D FEM model of an earth to air heat exchanger coupled with an air conditioning system in a continental climate zone. *Energy and Buildings*, 296, 113365. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113365>
- Cirillo, L., Greco, A., & Masselli, C. (2024). Daily, monthly and seasonal energy performances and economic assessment on the coupling of an earth to air heat exchanger to an already existing HVAC system: A case study for Italian cities. In *APPLIED THERMAL ENGINEERING* (Vol. 236, Fascicolo D). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121884>
- Comino, F., Romero-Lara, M. J., & Ruiz de Adana, M. (2022). Experimental and numerical study of dew-point indirect evaporative coolers to optimize performance and design. *International Journal of Refrigeration*, 142, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.06.006>
- De Masi, R. F., Ruggiero, S., Villano, F., Kytrilaki, A., Efthymiou, C., Papadaki, D., & Assimakopoulos, M. N. (2026). Performance and seasonal trade-offs of passive daytime radiative cooling roofs in European buildings. *Energy and Buildings*, 350, 116621. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116621>

- Do, H., & Cetin, K. S. (2022). Mixed-Mode Ventilation in HVAC System for Energy and Economic Benefits in Residential Buildings. *Energies*, 15(12), 4429. <https://doi.org/10.3390/en15124429>
- D'Olimpio, D. (2023). Il retrofitting tecnologico, energetico e bioclimatico nell'edilizia. Tecnologie e soluzioni tecniche per il miglioramento della prestazione energetico-ambientale degli edifici. *Legislazione Tecnica*.
- Domínguez-Torres, C.-A., & Domínguez-Delgado, A. (2024). Impact of radiative cooling on the energy performance of courtyards in Mediterranean climate. *Building Simulation*, 17(9), 1491–1513. <https://doi.org/10.1007/s12273-024-1153-2>
- Duarte, R. (2019a). Impact of Natural Ventilation on the Thermal and Energy Performance of Buildings in a Mediterranean Climate. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS9050123>
- Duarte, R. (2019b). Impact of Natural Ventilation on the Thermal and Energy Performance of Buildings in a Mediterranean Climate. *Buildings*. [https://www.academia.edu/42155762/Impact\\_of\\_Natural\\_Ventilation\\_on\\_the\\_Thermal\\_and\\_Energy\\_Performance\\_of\\_Buildings\\_in\\_a\\_Mediterranean\\_Climate](https://www.academia.edu/42155762/Impact_of_Natural_Ventilation_on_the_Thermal_and_Energy_Performance_of_Buildings_in_a_Mediterranean_Climate)
- Duarte, R., Gomes, M. da G., Moret Rodrigues, A., & Pimentel, F. (2023). A Large-Diameter Earth–Air Heat Exchanger (EAHX) Built for Standalone Office Room Cooling: Monitoring Results for Hot and Dry Summer Conditions. *Applied Sciences*, 13(22), 12134. <https://doi.org/10.3390/app132212134>
- Duarte, R., Moret Rodrigues, A., Pimentel, F., & Gomes, M. da G. (2025). Design and Performance of a Large-Diameter Earth–Air Heat Exchanger Used for Standalone Office-Room Cooling. *Applied Sciences*, 15(14), 7938. <https://doi.org/10.3390/app15147938>
- Ferrucci, M., & Peron, F. (2018). Ancient Use of Natural Geothermal Resources: Analysis of Natural Cooling of 16th Century Villas in Costozza (Italy) as a Reference for Modern Buildings. *Sustainability*, 10(12), Articolo 12. <https://doi.org/10.3390/su10124340>
- Ghandi, H., & Leone, M. F. (2024). The Potential of One-Sided Traditional Windcatchers for Outdoor Use as a Sustainable Urban Feature. *Urban Science*, 8(4), Articolo 4. <https://doi.org/10.3390/urban-sci8040229>
- Givoni, B. (1994). Givoni, B. (1994) Raffrescamento passivo e basso consumo energetico degli edifici. John Wiley e figli, Inc., Toronto. - Riferimenti—Editoria per la ricerca scientifica. <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=1663035>
- Givoni, B. (2011). Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar Energy, Progress in Solar Energy* 1, 85(8), 1692–1726. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.003>
- Grosjean, A., Touati, K., Alonzo, G., Ravat, H. C., Houot, T., El Mendili, Y., Nougaredes, B., & Camara, N. (2025). Experimental Raw Earth Building for Passive Cooling: A Case Study for Agricultural Application in a Mediterranean Climate. *Buildings*, 15(15), Articolo 15. <https://doi.org/10.3390/buildings15152603>
- Guo, R., Heiselberg, P., Hu, Y., Zhang, C., & Vasilevskis, S. (2020). Optimization of night ventilation performance in office buildings in a cold climate. *Energy and Buildings*, 225, 110319. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110319>
- Guo, X., Wei, H., He, X., Du, J., & Yang, D. (2022). Experimental evaluation of an earth-to-air heat exchanger and air source heat pump hybrid indoor air conditioning system. *Energy and Buildings*, 256, 111752. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111752>
- Gupta, N., & Tiwari, G. N. (2016). Review of passive heating/cooling systems of buildings. In *Energy Science and Engineering* (Vol. 4, Fascicolo 5, pp. 305–333). <https://doi.org/10.1002/ese3.129>
- Haile, M. G., Garay-Martinez, R., & Macarulla, A. M. (2024). Review of Evaporative Cooling Systems

- for Buildings in Hot and Dry Climates. *Buildings*, 14(11), 3504. <https://doi.org/10.3390/buildings14113504>
- Ibtissam, B., Imane, B., & Salima, L. (2022). Towards Low Energy and Thermal Comfort of Buildings Through Passive Cooling or Heating Strategies in Hot Arid Climates. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 93, 173–182. <https://doi.org/10.37934/arfmts.93.2.173182>
- IEA. (2018, maggio 15). IEA – International Energy Agency. IEA. <https://www.iea.org/futureofcooling>
- Imanloozadeh, A., & Lubitz, W. D. (2026). Characteristics, design, and optimization of earth-air heat exchangers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 230, 116677. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116677>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley, A c. Di). <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Ishugah, T. F., Kiplagat, J., Madete, J., & Musango, J. (2024). Current Status, Challenges, and Opportunities of Evaporative Cooling for Building Indoor Thermal Comfort Using Water as a Refrigerant: A Review. *International Journal of Energy Research*, 2024(1), 1026136. <https://doi.org/10.1155/2024/1026136>
- Izadpanahi, P., Farahani, L. M., & Nikpey, R. (2021). Lessons from Sustainable and Vernacular Passive Cooling Strategies Used in Traditional Iranian Houses. *Journal of Sustainability Research*, 3(3). <https://doi.org/10.20900/jsr20210014>
- Jeon, H., & Yoo, Y. (2024). Recent Advances in Passive Radiative Cooling: Material Design Approaches. *Elastomers and Composites*, 59(1), 22–33. <https://doi.org/10.7473/EC.2024.59.1.22>
- Jiang, Z., O'Neill, Z., & Dong, B. (2023). OCCUPIED: Long-term field experiment results from an occupant-centric control in an office building. In *ENERGY AND BUILDINGS* (Vol. 297). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113435>
- Jomehzadeh, F., Hussien, H. M., Calautit, J. K., Nejat, P., & Ferwati, M. S. (2020). Natural ventilation by windcatcher (Badgir): A review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate. *Energy and Buildings*, 226, 110396. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110396>
- Kamal, M. A. (2012). An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions. *Civil Engineering*, 55(1).
- Laurini, E., Taballione, A., Berardinis, P., Celi, A., & Gentile, S. (2016). Design of natural cooling systems in historical and high value city centre buildings.
- Lechner, N. (2009). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects.* WILEY.
- Lee, H.-C., Hsu, H.-C., Chang, C.-W., & Pan, C.-Y. (2025). Mixed-mode ventilation for indoor health and energy efficiency in subtropical climates. *Energy Reports*, 14, 1273–1282. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.07.022>
- Li, M., Shen, X., Wu, W., Cetin, K., McIntyre, F., Wang, L., Ding, L., Bishop, D., Bellamy, L., & Liu, M. (2025). Cooling demand reduction with nighttime natural ventilation to cool internal thermal mass under harmonic design-day weather conditions. *Applied Energy*, 379, 124947. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124947>
- Liang, J., Wu, J., Guo, J., Li, H., Zhou, X., Liang, S., Qiu, C.-W., & Tao, G. (2023). Radiative cooling for passive thermal management towards sustainable carbon neutrality. *National Science Review*, 10(1),

nwac208. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac208>

Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., & Valente, R. (2020). *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale-Adapting to the changing climate. Knowledge innovation for environmental design*. Ediz. Bilingue. Maggioli Editore.

Maiques, M., Tarragona, J., Gangoellés, M., & Casals, M. (2025). Energy implications of meeting indoor air quality and thermal comfort standards in Mediterranean schools using natural and mechanical ventilation strategies. *Energy and Buildings*, 328, 115076. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115076>

Manimegalai, R. (2014). Ventilation, passive cooling, ventilation strategies, wind tower, venturi effect, stack effect. [https://www.academia.edu/8107322/Ventilation\\_passive\\_cooling\\_ventilation\\_strategies\\_wind\\_tower\\_venturi\\_effect\\_stack\\_effect](https://www.academia.edu/8107322/Ventilation_passive_cooling_ventilation_strategies_wind_tower_venturi_effect_stack_effect)

Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 736–755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>

Marmion, P., Pradinuk, R., Woods, A., Guity, A., Rehmanji, I., & Hydro, B. (2012). Large Dynamic Thermal Labyrinth: A Step Towards Net Zero Energy Use in Acute Care Hospitals.

Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Halkos, G., Paravantis, J., Makridis, S., & Papaefthimiou, S. (2022). Applications of Earth-to-Air Heat Exchangers: A Holistic Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111921>

Navarro, L., de Gracia, A., Niall, D., Castell, A., Browne, M., McCormack, S. J., Griffiths, P., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system. *Renewable Energy*, 85, 1334–1356. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.064>

Nguyen, A.-T., & Reiter, S. (2014). A climate analysis tool for passive heating and cooling strategies in hot humid climate based on Typical Meteorological Year data sets. *Energy and Buildings*, 68, 756–763. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.050>

Niyadi, S. A., & Elnabawi, M. H. (2025). Optimizing hybrid ventilation in arid Climates: A systematic review and Dubai case study. *City and Environment Interactions*, 26, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100191>

Nqoro, X., Taziwa, R., Hasheni, T., & Giwa, S. (2025). Emerging Passive Cooling Technologies and Their Multidisciplinary Applications: An Integrative Review. *International Journal of Energy Research*, 2025(1), 3489021. <https://doi.org/10.1155/er/3489021>

Olgyay, V., Lyndon, D., Reynolds, J., & Yeang, K. (2015). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and expanded Edition*. Princeton University Press.

Otoo, C., Lu, T., & Lü, X. (2024). Application of Mixed-Mode Ventilation to Enhance Indoor Air Quality and Energy Efficiency in School Buildings. *Energies*, 17(23), 6097. <https://doi.org/10.3390/en17236097>

Peng, Y., Lei, Y., Tekler, Z. D., Antanuri, N., Lau, S.-K., & Chong, A. (2022). Hybrid system controls of natural ventilation and HVAC in mixed-mode buildings: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, 276, 112509. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112509>

Pfafferott, J., Herkel, S., & Wambsganß, M. (2004). Design, monitoring and evaluation of a low energy office building with passive cooling by night ventilation. *Energy and Buildings*, EPIC-3rd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, 36(5), 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.041>

- Prieto, A., Knaack, U., Klein, T., & Auer, T. (2017). 25 Years of cooling research in office buildings: Review for the integration of cooling strategies into the building façade (1990–2014). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.012>
- Rim, M., Sung, U.-J., & Kim, T. (2018). Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption. *Energies*, 11(10), 2762. <https://doi.org/10.3390/en11102762>
- Rincón, L., Gangoilells, M., Medrano, M., & Casals, M. (2024). Climate change mitigation and adaptation in Spanish office stock through cool roofs. *Energy and Buildings*, 323, 114738. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114738>
- Romero-Lara, M. J., Comino, F., & De Adana, M. R. (2023). Seasonal energy efficiency ratio of regenerative indirect evaporative coolers—Simplified calculation method. *Applied Thermal Engineering*, 220, 119710. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119710>
- Sajjad, U., Abbas, N., Hamid, K., Abbas, S., Hussain, I., Ammar, S. M., Sultan, M., Ali, H. M., Hussain, M., Tauseef-ur-Rehman, & Wang, C. C. (2021). A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 122, 105140. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105140>
- Salata, F., Falasca, S., Ciancio, V., Curci, G., Grignaffini, S., & de Wilde, P. (2022). Estimating building cooling energy demand through the Cooling Degree Hours in a changing climate: A modeling study. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103518. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103518>
- Salimi, A., Yurtyapan, A., Ouria, M., Turkan, Z., & Pilehvarian, N. K. (2025a). An Overview of Natural Cooling and Ventilation in Vernacular Architectures. *Wind*, 5(3), 21. <https://doi.org/10.3390/wind5030021>
- Salimi, A., Yurtyapan, A., Ouria, M., Turkan, Z., & Pilehvarian, N. K. (2025b). An Overview of Natural Cooling and Ventilation in Vernacular Architectures. *Wind*, 5(3), 21. <https://doi.org/10.3390/wind5030021>
- Santamouris, M. (2005). Passive cooling of buildings. *KGH – Klimatizacija grejanje hladenje*, 34.
- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>
- Seghetti, E. (2017, ottobre 4). Raffreddamento evaporativo in facciata—Dall’India una facciata a nido d’ape in tubi di terracotta che si trasforma in cascata: Una soluzione per raffrescare in modo naturale e dare un tocco di design agli edifici [Tecnologie innovative]. *Build News*. <https://www.buildnews.it/articolo/raffreddamento-evaporativo-in-facciata>
- Sehli, A. (2022). The Earth to Air Heat Exchanger for Reducing Energy Consumption in South Algeria. *International Journal of Heat and Technology*. <https://doi.org/10.18280/IJHT.400136>
- Shindo, K., Ikai, K., Shinoda, J., Matsumura, R., & Tanabe, S. (2024). Design and control of radiant heating and cooling systems in Japan: Results from expert interviews. In *JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW* (Vol. 7, Fascicolo 1). WILEY. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12451>
- Song, S., Han Lim, J., & Hee Song, J. (2014). Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy: A case study of an educational facility in South Korea | Request PDF. [https://www.researchgate.net/publication/265909378\\_Effectiveness\\_of\\_a\\_thermal\\_labyrinth\\_ventilation\\_system\\_using\\_geothermal\\_energy\\_A\\_case\\_study\\_of\\_an\\_educational\\_facility\\_in\\_South\\_Korea?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ](https://www.researchgate.net/publication/265909378_Effectiveness_of_a_thermal_labyrinth_ventilation_system_using_geothermal_energy_A_case_study_of_an_educational_facility_in_South_Korea?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ)
- Song, S.-Y., Song, J.-H., & Lim, J.-H. (2012). Annual energy performance evaluation of thermal labyrinth



ventilation system (TLVS) using measured data | Request PDF. [https://www.researchgate.net/publication/289296515\\_Annual\\_energy\\_performance\\_evaluation\\_of\\_thermal\\_labyrinth\\_ventilation\\_system\\_TLVS\\_using\\_measured\\_data?\\_tp=eyJjb250ZXh0ljp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoiX2RpcmVjdCJ9fQ](https://www.researchgate.net/publication/289296515_Annual_energy_performance_evaluation_of_thermal_labyrinth_ventilation_system_TLVS_using_measured_data?_tp=eyJjb250ZXh0ljp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoiX2RpcmVjdCJ9fQ)

Song, Y., Darani, K. S., Khdair, A. I., Abu-Rumman, G., & Kalbasi, R. (2021). A review on conventional passive cooling methods applicable to arid and warm climates considering economic cost and efficiency analysis in resource-based cities. *Energy Reports*, 7, 2784–2820. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.056>

Souliotis, M. (2021). Applications of earth-to-air heat exchangers: A holistic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111921>

Szokolay, S. V. (2014). *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*. Routledge.

Tewari, P., Mathur, S., & Mathur, J. (2019). Thermal performance prediction of office buildings using direct evaporative cooling systems in the composite climate of India. *Building and Environment*, 157, 64–78. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.044>

Tognon, G., Marigo, M., De Carli, M., & Zarrella, A. (2023). Mechanical, natural and hybrid ventilation systems in different building types: Energy and indoor air quality analysis. *Journal of Building Engineering*, 76, 107060. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107060>

Toroxel, J. L., & Silva, S. M. (2024). A Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies Based on Bioclimatic and Vernacular Architecture. *Energies*, 17(5), 1006. <https://doi.org/10.3390/en17051006>

Tucci, F. (2020). *Atlante dei sistemi tecnologici per l'architettura bioclimatica: Raffrescamento passivo in architettura /Atlas of technological systems for bioclimatic architecture: Passive cooling in architecture. vol.2.*

Tucci, F., Herzog, T., & Ronchi, E. (2018). *Costruire e abitare green. Approcci, strategie, sperimentazioni per una progettazione tecnologica ambientale-Green building and dwelling. Approaches, ... Technological design*. Ediz. Bilingue. Altralinea Edizioni.

UNEP. (2023). *Keeping Cool in an Increasingly Hotter World: UNEP Spotlight*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44243>

UNI EN 16798-7. (2018). *UNI EN 16798-7:2018—UNI Ente Italiano di Normazione—Prestazione energetica degli edifici—Ventilazione per gli edifici—Parte 7: Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici compresa l'infiltrazione (Moduli M5-5)*. <https://store.uni.com/uni-en-16798-7-2018>

Veršić, Z., Binički, M., & Nosil Mešić, M. (2022). Passive Night Cooling Potential in Office Buildings in Continental and Mediterranean Climate Zone in Croatia. *Buildings*, 12(8), 1207. <https://doi.org/10.3390/buildings12081207>

Xia, L., Li, H., He, S., Geng, Z., Zhang, S., Long, F., Long, Z., Li, J., Yuan, W., & Gao, M. (2026). Research Progress and Application Status of Evaporative Cooling Technology. *Energies*, 19(2), 570. <https://doi.org/10.3390/en19020570>

Xiang, H., & Li, J. (2024). Impact of Night Ventilation on Indoor Thermal Environment of Residential Buildings under the Dual Carbon Target: A Case Study of Xi'an. *Buildings*, 14(8), 2459. <https://doi.org/10.3390/buildings14082459>

Xiong, J., Yao, R., Grimmond, S., Zhang, Q., & Li, B. (2019). A hierarchical climatic zoning method for

energy efficient building design applied in the region with diverse climate characteristics. *Energy and Buildings*, 186, 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.005>

Yang, Y., Zhang, G., & Rong, L. (2024). Cooling energy savings from passive daytime radiative cooling in Europe: A comparative analysis with and without population weighting from open-source data, with additional comparisons to Chinese cities. *Energy Conversion and Management*, 314, 118616. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118616>

Yeretzian, A., & Karam, J. (2023). Optimizing the use of natural ventilation while reducing energy cost\_ case study for retrofitting an old residential apartment in a Mediterranean city. *Energy and Buildings*, 296, 113371. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113371>





PARTE II

# OBIETTIVI DI PROGETTAZIONE, STRATEGIE, INDICATORI, CASI DI STUDIO E PRODOTTI DEI COMPONENTI

#### *ABSTRACT (INGLESE)*

*Chapter 3 presents a systemic analysis of the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), conceived as a passive thermo-environmental infrastructure for the efficient pre-treatment of ventilation air. It is defined not merely as a technology, but as a thermal coupling mechanism between the building and the ground, based on thermal inertia, time lag, and convective air-mass heat exchange. Outdoor air, conveyed through underground ducts with high thermal mass, undergoes passive modulation that enables summer pre-cooling and winter pre-heating, thereby reducing the enthalpy gap required from HVAC systems and transforming ventilation into an energy resource. The operation of the system is described through a thermodynamic interpretation of heat storage and release cycles, highlighting the role of the labyrinthine mass as an energy flywheel capable of attenuating daily thermal fluctuations. Performance depends on duct geometry, material properties, and airflow dynamics, making proper sizing a crucial design phase. The architectural analysis shows how the TLVS is integrated into the building structure and differentiated from traditional earth-to-air heat exchangers in terms of scale, airflow management, and maintainability. International case studies confirm its flexibility and applicability to both new constructions and retrofit interventions. Experimental evidence indicates that supply air temperature variations generally range between 1 and 8 °C, with peaks exceeding 10–12 °C. Reductions in ventilation energy loads often fall between 20% and 40%, with significant effects on peak demand. Operational monitoring reports decreases in outdoor air loads of up to 47.6% in cooling and over 40% in heating, while annual energy savings typically range between 10% and 30%. These results confirm the TLVS as an effective strategy for reducing energy demand and stabilizing thermo-hygrometric comfort conditions. The chapter also addresses the critical issues associated with underground systems, particularly hygrothermal phenomena and condensation risks. Moisture control and hygienic air quality emerge as essential conditions, requiring appropriate materials, microclimatic regulation, and continuous monitoring. Finally, the economic assessment highlights payback periods of 5–10 years and a service life exceeding 40 years, consistent with long-term decarbonization strategies.*

## THERMAL LABYRINTH VENTILATION SYSTEM (TLVS)

### ABSTRACT

Il Capitolo 3 presenta un'analisi sistemica del *Thermal Labyrinth Ventilation System* (TLVS), inteso come infrastruttura termo-ambientale passiva per il pretrattamento efficiente dell'aria di ventilazione. È definito non come semplice tecnologia, ma come meccanismo di accoppiamento termico tra edificio e sottosuolo, basato su inerzia termica, sfasamento temporale e scambio convettivo aria-massa. L'aria esterna, convogliata in condotti ipogei ad elevata massa termica, subisce una modulazione passiva che permette pre-raffrescamento estivo e pre-riscaldamento invernale, riducendo il salto entalpico richiesto ai sistemi HVAC e trasformando la ventilazione in risorsa energetica. Il funzionamento del sistema è descritto tramite una lettura termo-dinamica dei cicli di accumulo e rilascio del calore, evidenziando il ruolo della massa labirintica come volano energetico capace di attenuare le oscillazioni termiche giornaliere. Le prestazioni dipendono da geometria dei condotti, proprietà dei materiali e dinamica dei flussi d'aria, rendendo il dimensionamento un passaggio progettuale cruciale. L'analisi architettonica mostra come il TLVS sia integrato nella struttura edilizia e distinto dai tradizionali earth-to-air heat exchangers per scala, gestione delle portate e manutenibilità. I casi studio internazionali ne confermano la flessibilità e l'applicabilità sia a nuove costruzioni sia a riqualificazioni. Le evidenze sperimentali indicano variazioni termiche dell'aria di rinnovo generalmente tra 1 e 8 °C, con picchi oltre 10–12 °C. Le riduzioni dei carichi energetici di ventilazione si collocano spesso tra il 20% e il 40%, con effetti significativi sui picchi. Monitoraggi operativi riportano decrementi dei carichi dell'aria esterna fino al 47,6% in raffrescamento e oltre il 40% in riscaldamento, mentre i risparmi annuali variano tipicamente tra il 10% e il 30%. Tali risultati confermano il TLVS come strategia efficace di riduzione della domanda energetica e stabilizzazione del comfort termo-igrometrico. Il capitolo affronta inoltre le criticità dei sistemi ipogei, in particolare i fenomeni igrotermici e i rischi di condensa. La gestione dell'umidità e la qualità igienico-sanitaria emergono come condizioni essenziali, richiedendo materiali idonei, controllo microclimatico e monitoraggio. Infine, la valutazione economica evidenzia tempi di ritorno di 5–10 anni e vita utile superiore ai 40 anni, in coerenza con le strategie di decarbonizzazione.



### 3.1 Introduzione al *Thermal Labyrinth Ventilation System* (TLVS): descrizione generale e principi di funzionamento

Il *Thermal Labyrinth Ventilation System* (TLVS) è una tecnologia passiva ad alta efficienza energetica, progettata per ridurre i consumi energetici attraverso un approccio innovativo. Il sistema sfrutta la capacità termica dei materiali massivi per modificare naturalmente la temperatura dell'aria di ventilazione (Marmion et al., 2012; Rim et al., 2018a; S. Song et al., 2014). L'aria esterna entra attraverso un percorso sotterraneo a forma di labirinto realizzato in strutture di calcestruzzo, tipicamente integrate nelle fondazioni o nei piani interrati dell'edificio.

Durante il tragitto, l'aria scambia calore con il terreno circostante: in estate viene raffreddata (*pre-cooling*) e in inverno riscaldata (*pre-heating*) prima di essere immessa negli ambienti interni. Si tratta dunque di una forma di geothermal ventilation, in cui il suolo funge da serbatoio termico naturale. Questo concetto non è nuovo: soluzioni analoghe che sfruttavano la massa termica del terreno per mitigare il clima interno erano presenti già in epoche antiche (Persiani e Romani), e sono state riscoperte e adattate nell'architettura sostenibile moderna (Capitolo 2, § 2.1).

Il funzionamento può essere spiegato come un ciclo termico diurno: di giorno il labirinto assorbe calore dall'aria calda in ingresso (raffreddandola e riscaldando gradualmente le pareti), mentre di notte le pareti calde cedono calore all'aria esterna più fresca (riscaldandola e raffreddando a loro volta il labirinto), completando un ciclo di accumulo e rilascio che appiana le escursioni termiche giornaliere. In questo modo il TLVS fornisce un'aria di rinnovo già pre-trattata termicamente, riducendo il lavoro richiesto ai sistemi meccanici di climatizzazione (Rim et al., 2018a; S. Song et al., 2014). Secondo Song et al., il TLVS “sfrutta il ritardo termico e la capacità termica elevata della massa labirintica per fornire un effetto di raffreddamento naturale durante i mesi estivi”.

**Tabella 3.1** Definizione del sistema TLVS nella letteratura scientifica.  
Fonte: K. Mitrik

Tra altre definizioni del sistema raccolto in letteratura troviamo quanto segue:

| Autori, anno                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Titolo paper                                                                                                                            | Definizione                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Song et al., 2012                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Annual Energy Performance Evaluation of Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) Using Measured Data                                 | Un TLVS è un sistema di ventilazione che aspira l'aria esterna attraverso una struttura sotterranea in cemento a forma di labirinto. Grazie allo scambio termico con il terreno, questo sistema è in grado di pre-raffreddare e pre-riscaldare l'aria esterna rispettivamente in estate e in inverno.                                                                                                    |
| Song et al., 2014                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Effectiveness of a Thermal Labyrinth Ventilation System Using Geothermal Energy: A Case Study of an Educational Facility in South Korea | Un TLVS è una delle tecnologie di ventilazione ad alta efficienza energetica che utilizza il calore geotermico rinnovabile, che pre-raffredda o pre-riscalda l'aria esterna di ventilazione attraverso lo scambio di calore tra l'aria in entrata e l'ambiente geotermico utilizzando canali di aspirazione a forma di labirinto integrati nelle strutture in calcestruzzo del seminterrato sotterraneo. |
| Rim et al., 2018                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption                                                | Un sistema a labirinto termico è interrato sotto l'edificio e può pre-raffreddare o pre-riscaldare l'aria esterna attraverso il trasferimento di calore con il terreno circostante.                                                                                                                                                                                                                      |
| Annan & Nehme, 2016                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Energy Efficient Building Design Optimization Using an Underground Thermal Labyrinth                                                    | Un labirinto termico è un tipo di sistema di ventilazione che aspira l'aria esterna attraverso una struttura sotterranea in cemento armato che fa parte della costruzione dell'edificio. Durante le stagioni estiva e invernale, un TLVS può rispettivamente pre-raffreddare e pre-riscaldare l'aria esterna attraverso lo scambio termico con il terreno.                                               |
| Marmion et al., 2012                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Large Dynamic Thermal Labyrinth: A Step Towards Net Zero Energy Use in Acute Care Hospitals                                             | Il labirinto termico dinamico utilizza una massa termica a base acquosa per modulare la temperatura dell'aria esterna in entrata, riscaldando o raffreddando l'aria di ventilazione ogni volta che ciò comporta un vantaggio energetico e disaccoppiandola quando non è necessario.                                                                                                                      |
| Buro Happold, 2013<br><a href="https://www.designingbuildings.co.uk/">https://www.designingbuildings.co.uk/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                         | Labirinti termali                                                                                                                       | Un labirinto termico disaccoppia la massa termica dallo spazio occupato, solitamente creando una struttura di cemento ad alta massa termica con un'ampia superficie. Disaccoppiare la massa termica significa che può essere raffreddata a una temperatura inferiore rispetto a quella che avrebbe se si trovasse nello spazio occupato.                                                                 |
| Schouweiler, R. D.<br>Basement Thermal Labyrinth Proves Key to Project Success.<br>ASHRAE Journal 2022, 64 (8), 49–50.<br><a href="https://www.dpr.com/media/press-releases/dpr-construction-moves-into-new-sacramento-office-with-the-environment-in-mind">https://www.dpr.com/media/press-releases/dpr-construction-moves-into-new-sacramento-office-with-the-environment-in-mind</a> | Basement Thermal Labyrinth Proves Key to Project Success                                                                                | Un labirinto termico (sistema di efficienza geotermica) che produrrà naturalmente un "raffreddamento gratuito" dell'aria esterna nei mesi più caldi e un "riscaldamento gratuito" dell'aria esterna nei mesi più freddi.                                                                                                                                                                                 |

Dal punto di vista impiantistico, un labirinto termico si distingue dai tradizionali sistemi a tubi interrati (earth tubes o earth-to-air heat exchangers): invece di condotte di piccolo diametro sepolte nel terreno esterno, il TLVS utilizza canali di grandi dimensioni inglobati nella struttura dell'edificio (Rim et al., 2018a; S. Song et al., 2014). Ciò comporta alcuni vantaggi chiave: non sono necessari estesi scavi esterni perché si sfruttano i volumi interrati dell'edificio stesso, e la sezione di passaggio molto ampia consente di trattare portate d'aria maggiori rispetto ai sistemi a tubi (che sono limitati dal diametro dei condotti). Inoltre, la manutenzione risulta semplificata grazie all'accessibilità interna del labirinto, a differenza dei tubi sotterranei difficili da ispezionare. Di contro, l'uso del calcestruzzo come mezzo di scambio termico – pur offrendo grande inerzia termica – ha una conduttività inferiore a quella di tubazioni metalliche, il che significa che per ottenere un efficace scambio termico occorre disporre di condotti più lunghi e favorire velocità dell'aria ridotte, così da massimizzare il tempo di contatto aria-superficie (Al Martini et al., 2023; Daza-Badilla et al., 2024). Numerosi studi su scambiatori aria-terra mostrano che all'aumentare della portata l'efficacia tende a calare per riduzione del tempo di contatto e crescono le perdite di carico, per cui le velocità ottimali sono contenute (Lattieff et al., 2022; Mihalakakou et al., 2022). Questo principio progettuale è riconosciuto anche dai progettisti: ad esempio, Bellew (ingegnere coinvolto nel progetto Federation Square) nota che se l'aria attraversa il labirinto troppo velocemente l'efficienza di scambio diminuisce e le perdite di carico aumentano, penalizzando il bilancio energetico complessivo. Pertanto, il TLVS viene dimensionato per far muovere l'aria a velocità moderate, facilitando lo scambio termico convettivo con le pareti e mantenendo basso il consumo dei ventilatori di spinta.

## 3.2 Obiettivi e finalità del sistema

Il principale obiettivo di un sistema TLVS è ridurre il fabbisogno energetico necessario per il ricambio d'aria di un edificio, garantendo al contempo adeguate condizioni di comfort termoigrometrico e qualità dell'aria interna. Nei moderni edifici ad alta efficienza energetica e molto isolati, la ventilazione incide significativamente sui consumi: i carichi termici dovuti all'aria esterna possono rappresentare circa il 35–40% del carico termico di picco di raffrescamento o riscaldamento (S. Song et al., 2014). Ciò avviene perché in condizioni climatiche estreme (estate calda o inverno rigido) l'aria esterna introdotta deve essere portata ai valori di comfort interno tramite energia frigorifera o termica aggiuntiva, gravando sui sistemi HVAC (Chiesa et al., 2019; Santamouris & Kolokotsa, 2013). Implementando un labirinto termico, si pre-condiziona naturalmente l'aria di ventilazione sfruttando l'inerzia termica del sottosuolo, con il risultato di abbattere tali carichi aggiuntivi. In sintesi, il TLVS mira a fornire ventilazione igienica a basso consumo energetico, con benefici sia in termini economici sia ambientali. Song et al. (2014) sottolineano come l'uso di sistemi di ventilazione efficienti di questo tipo sia strategico per ridurre i consumi energetici degli edifici e rispettare le sempre più stringenti normative sulla qualità dell'aria indoor senza incorrere in penalizzazioni energetiche eccessive.

Oltre al risparmio energetico, un fine concomitante del TLVS è migliorare o mantenere elevate le condizioni di comfort interno. Garantire aria fresca di rinnovo in quantità adeguate è essenziale per la salute degli occupanti, e il labirinto consente di farlo minimizzando l'uso di sistemi meccanici di climatizzazione anche in condizioni climatiche sfavorevoli (Seppänen & Fisk, 2006; Pardeshi et al., 2020). Un esempio emblematico è il complesso di Federation Square a Melbourne: grazie al grande labirinto termico integrato sotto la piazza, è stato possibile eliminare completamente gli impianti di raffreddamento meccanico nell'ampio atrio vetrato aperto al pubblico, riuscendo comunque a mantenere condizioni di comfort nei giorni più caldi (Santamouris, 2018). Secondo i progettisti, il labirinto ha permesso di fornire aria raffrescata all'atrio senza costi



energetici significativi, evitando l'installazione di chillers e sistemi tradizionali ritenuti "illogici e costosi da far funzionare" per quello spazio quasi esterno. In generale, l'adozione di un TLVS si inserisce negli obiettivi di sostenibilità e decarbonizzazione degli edifici: riducendo la domanda di energia per la climatizzazione, contribuisce a diminuirne le emissioni di CO<sub>2</sub> (Chiesa et al., 2019; Grosso, 2008; Santamouris & Kolokotsa, 2013). Nel caso di Federation Square, ad esempio, il labirinto termico è stato riconosciuto come un elemento chiave nel percorso per far divenire il complesso carbon-neutral (a emissioni zero) a soli dieci anni dall'inaugurazione. L'investimento in un labirinto, quindi, può essere motivato sia da ragioni economiche (risparmio sui costi operativi) sia da finalità ambientali di lungo termine, in linea con le strategie di edifici a energia quasi zero (nZEB) promosse a livello internazionale.

## 3.3 Caratteristiche costruttive e funzionali

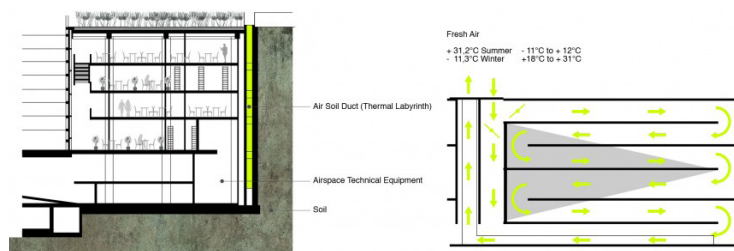
### 3.3.1 Tipologie e configurazioni architettoniche

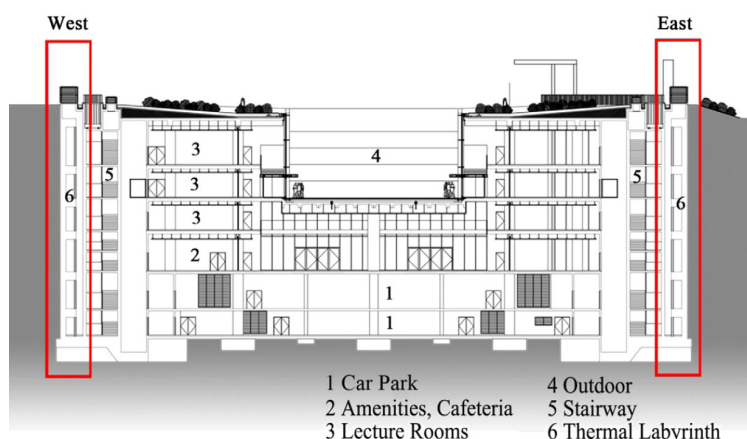
Le modalità di integrazione di un labirinto termico in un edificio possono variare a seconda della conformazione dell'edificio stesso. In letteratura si distinguono essenzialmente due configurazioni di base:

- **Labirinto verticale:**

Sfrutta le pareti verticali interrato (setti e muri controterra) come superfici di scambio termico. È indicato per edifici che dispongono di più piani interrati sovrapposti; in tali casi, le pareti dei diversi livelli possono essere organizzate in modo da costituire un percorso tortuoso verticale per l'aria, aumentando il tempo di contatto con il terreno. Un esempio significativo è il caso studio Ewha Womans University Campus Complex in Seoul, Corea del Sud (*Figura 3.1-3.2*) caso studiato da Song et al., l'impianto TLVS è costituito da un condotto labirintico orizzontale esteso per circa 288 m al 1<sup>o</sup>-3<sup>o</sup> piano interrato (che sfrutta le pareti perimetrali controterra di questi livelli come superfici di scambio, per un totale di circa 941 m<sup>2</sup>) e da un condotto verticale di bypass alto ~25 m che collega direttamente l'ingresso dell'aria agli AHU al 6<sup>o</sup> piano interrato. In condizioni normali l'aria esterna viene fatta passare attraverso il percorso orizzontale a serpentina, mentre il condotto verticale viene aperto solo quando le condizioni esterne sono già favorevoli (primavera/autunno), permettendo di bypassare il labirinto e immettere l'aria direttamente negli impianti di trattamento. Questo approccio ibrido massimizza l'efficacia del sistema adattandolo alle diverse stagioni.

*Figura 3.1* Tipologia verticale del TLVS presso Ewha Womans University Campus Complex in Seoul, Corea del Sud. Fonte: <https://www.inside-flows.org/project/ewha-campus-complex/>





**Figura 3.2** Sezione trasversale dell'edificio del caso studio, con evidenza del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) integrato nei volumi laterali ipogei (6). Sono indicati i principali spazi funzionali: (1) parcheggio, (2) servizi e mensa, (3) aule, (4) area esterna, (5) vano scala. Fonte: Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy – A case study of an educational facility in South Korea (ResearchGate).

#### • Labirinto orizzontale

Si sviluppa prevalentemente in pianta su uno o pochi livelli interrati. L'aria percorre un tragitto a zigzag attraverso corridoi e vani sotterranei appositamente realizzati, che presentano pareti interne in cemento armato atte ad aumentare la superficie di scambio. Questa configurazione è adatta ad edifici con pochi piani interrati e ampie superfici disponibili al di sotto del piano (Figura 3.3).

Numerose realizzazioni forniscono esempi concreti di queste configurazioni. Un labirinto orizzontale di riferimento è quello installato sotto la piazza di Federation Square (Melbourne, Australia): esso occupa un'area di circa 1.600 m<sup>2</sup>, costituito da pareti in calcestruzzo prefabbricato alte ~3 m disposte a zigzag con un'intercapedine di circa 0,6 m tra di esse. L'aria viene introdotta tramite aperture sul lato del sito e attraversa un percorso totale di circa 1,4 km di lunghezza, giungendo all'atrio vetrato centrale con una temperatura fino a 12 °C inferiore a quella esterna nelle condizioni estive di picco. Questo labirinto svolge un duplice ruolo: strutturale, in quanto le sue pareti fungono da sostegno per la piazza sovrastante, e impiantistico, fornendo aria raffrescata all'atrio e pre-raffreddando l'aria destinata ai sistemi di climatizzazione degli edifici adiacenti.

Un altro esempio è il Municipal Theater di Heilbronn (Germania), dove un labirinto di tipo orizzontale di circa 140 m<sup>2</sup> è stato integrato nel piano interrato: esso consente di ridurre la temperatura dell'aria esterna di ~1–8 °C durante l'estate e di incrementarla di 2–4 °C in inverno, migliorando così l'efficienza della ventilazione in entrambe le stagioni.

Questi progetti dimostrano la flessibilità di inserimento dei TLVS: a seconda delle esigenze, il labirinto può occupare interi piani sotterranei, come nel caso australiano, oppure essere confinato in porzio-



**Figura 3.3** Tipologia orizzontale del TLVS presso il Federation Square (Melbourne, Australia). Fonte: Australian Institute of Refrigeration, Air-conditioning and Heating – AIRAH 100 Faces (#042) – Federation Square, Melbourne.

ni più limitate di sottosuolo, come nel caso tedesco, adattandosi alla scala dell'edificio.

Va menzionato che i labirinti termici sono quasi sempre sistemi su misura, inseriti nell'architettura specifica di ciascun progetto: ad esempio, nel caso di Federation Square l'idea di adottare il labirinto emerse sin dalle primissime fasi di progettazione integrata con gli ingegneri ambientali, permettendo di riservare fin da subito lo spazio necessario sotto la piazza. In quel caso particolare, la configurazione definitiva fu in parte determinata da opportunità contingenti: durante lo sviluppo del progetto si identificò un ampio volume inutilizzato al di sopra delle linee ferroviarie interrate, sotto la piazza, che venne sfruttato per collocare il labirinto quando si comprese che il contatto diretto col suolo sarebbe stato limitato.

Ciò sottolinea come i vincoli architettonici e strutturali del sito possano influenzare la tipologia di TLVS adottabile, richiedendo creatività progettuale per integrare efficacemente il labirinto nell'edificio (si veda Capitolo 3, § 3.4.2). In generale, comunque, i TLVS vengono considerati sistemi intrinsecamente integrati nell'architettura: a differenza di altre soluzioni sostenibili esibite spesso in facciata (pannelli solari, turbine eoliche colorate, ecc.), i labirinti termici operano in modo discreto, "integrati e incorporati nel disegno architettonico" stesso, come evidenziato nel caso di Federation Square.

Nell'ambito dell'analisi dei casi studio e della letteratura scientifica, è emersa una significativa varietà di configurazioni della massa termica dei TLVS. Sebbene il principio fisico alla base del loro funzionamento sia comune, ovvero l'inerzia termica del suolo sfruttata per il trattamento dell'aria, le soluzioni adottate nei diversi contesti architettonici e geografici si distinguono per forma, orientamento, materiale e soprattutto geometria delle superfici interne. Si propone quindi una classificazione delle tipologie di labirinto basata prevalentemente sulla configurazione delle pareti interne, evidenziando come variazioni morfologiche (lisce, grezze, ondulate, quadrettate, romboidali) influenzano le modalità di scambio termico e la distribuzione del flusso d'aria.

Le diverse configurazioni morfologiche dei labirinti termici incidono in modo determinante sul comportamento termo-fluidodinamico del TLVS, influenzando simultaneamente scambio termico, perdite di carico, velocità dell'aria e aspetti manutentivi. I casi studio riportati evidenziano come la geometria e la finitura superficiale delle pareti non siano semplici scelte costruttive, ma veri e propri parametri prestazionali.

- I **labirinti con pareti in calcestruzzo lisce**, come quelli del Nuovo Teatro Comunale di Heilbronn (Germania) (Figura 3.4) e del Kent College's Great Hall a Canterbury (Regno Unito) (Figura 3.5), presentano superfici interne regolari che favoriscono un flusso d'aria più lineare e velocità di attraversamento elevate. Questa soluzione riduce attriti e accumuli di particolato, semplificando ispezione e manutenzione, pur limitando leggermente lo scambio termico convettivo rispetto alle superfici più ruvide (Fonti: Rim, Sung & Kim 2018; CIBSE Journal).
- I **labirinti con pareti in calcestruzzo grezze**, come nel Big Data Institute di Oxford (Regno Unito) (Figura 3.6), sfruttano la rugosità naturale del materiale per aumentare la superficie di contatto e promuovere micro-turbolenze locali, migliorando lo scambio termico e la capacità di raffreddamento passivo, sebbene con una possibile maggiore resistenza al flusso d'aria (Fonte: RC-news.it (come utilizzare la struttura in cemento per raffreddare e ventilare)).
- Le **pareti ondulate** aumentano significativamente la superficie attiva e inducono turbolenza controllata nel flusso d'aria, intensificando lo scambio termico senza ricorrere a componenti meccaniche aggiuntive: questo accorgimento migliora l'efficienza di raffreddamento passivo nei contesti climatici con forte escursione termica.
- Le **pareti quadrettate**, come nella sede centrale TMB ad Ankara (Turchia) (Figura 3.7), adottano una geometria modulare a griglia ottenuta tramite casseforme speciali. Questa configurazione favorisce l'interazione termica tra aria e struttura, mantenendo logica costruttiva ripetibile e controllabile in fase esecutiva (Fonte: Atelier Ten – TMB Headquarters).
- I **labirinti con pareti a zig zag**, tipici di progetti con esigenze complesse di ventilazione e integrazione strutturale come Federation Square a Melbourne (Figura 3.8), generano un profilo dinamico interno che incrementa la turbolenza e migliora la distribuzione dell'aria all'interno del condotto (Fonte: Atelier Ten – Federation Square).

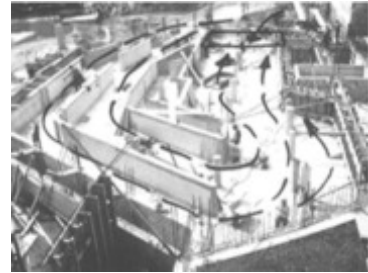


Figura 3.4 TLVS del Nuovo Teatro Comunale di Heilbronn. Fonte: ScienceDirect, Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy.



Figura 3.5 TLVS del Kent College's Great Hall. Fonte: CIBSE Journal, Chamber Music (case study).



Figura 3.6 TLVS del Big Data Institute di Oxford. Fonte: <https://www.makearchitects.com/wp-content/uploads/2017/11/BDI-Make-14>

Rim et al., dalle simulazioni conferma che “per ottenere un sistema di labirinto termico efficiente, è necessario realizzare superfici interne goffrate sulle pareti e sul pavimento” e anche Song et al. ag-



Figura 3.7 TLVS del sede centrale TMB ad Ankara. Fonte: -

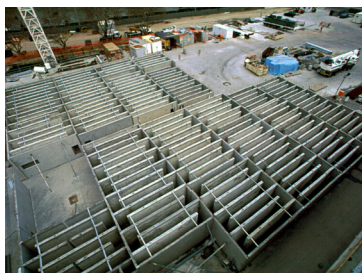


Figura 3.8 TLVS della sede Federation Square a Melbourne. Fonte: -

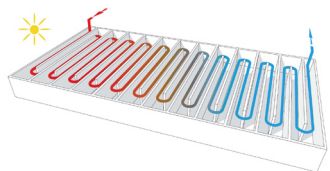


Figura 3.9 Struttura labirintica in calcestruzzo per il trattamento passivo dell'aria. Fonte: Marmion, M., Henderson, D., & Eames, M. (2012). *The Federation Square thermal labyrinth: Design and performance*. *Proceedings of Building Simulation Conference*.

giunge che “i sistemi più efficaci mostrano una struttura segmentata e distribuita che facilita una migliore dissipazione del calore”.

### 3.3.2 Componenti principali e materiali impiegati

Il funzionamento di un TLVS si fonda sull'integrazione sinergica di più componenti, ciascuno con una funzione specifica all'interno del processo di trattamento passivo dell'aria. L'efficacia del sistema non dipende unicamente dalla geometria del labirinto, ma dall'interazione tra materiali, dinamica dei flussi e sistemi di controllo. Ogni elemento va calibrato per massimizzare lo scambio termico tra l'aria in transito e la massa del materiale labirintico. I principali componenti sono:

- Presa d'aria esterna: è l'apertura attraverso cui l'aria fresca viene captata dall'esterno. Può assumere la forma di una torretta di presa d'aria, di una griglia a filo del terreno o di un condotto verticale dedicato. Questa bocca d'ingresso è in genere provvista di reticelle anti-intrusione e di filtri grossolani, per impedire l'accesso di insetti, piccoli animali, fogliame e polveri all'interno del sistema.

Vengono utilizzate tre modalità di flusso d'aria attraverso il labirinto (Marmion et al., 2012):

-Aria che fluisce lentamente attraverso il labirinto verso le sale di distribuzione delle apparecchiature di trattamento aria che servono ciascuno dei blocchi funzionali.

-Aria che fluisce direttamente nelle sale di distribuzione delle apparecchiature di trattamento aria bypassando il labirinto.

-Aria che fluisce attraverso il labirinto a velocità dell'aria più elevate generate dalle torri di lavaggio assistite dal vento (bypassando la sala di distribuzione delle apparecchiature di trattamento aria).

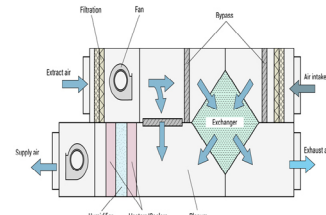
- **Struttura labirintica sotterranea (Figura 3.9):** è il cuore del TLVS, costituita da un percorso canalizzato a geometria tortuosa. Tipicamente è realizzata in calcestruzzo armato, materiale che combina robustezza strutturale e alta capacità termica. Le pareti in cemento formano una serie di corridoi, camere e strettoie che aumentano il tempo di permanenza dell'aria e la superficie di scambio termico. Spesso si utilizzano finiture superficiali che incrementano la rugosità e l'area di contatto (come nel caso delle pareti corrugate o ondulate impiegate a Federation Square). Nel labirinto possono essere presenti canalette di scolo per raccogliere l'eventuale condensa (si veda Capitolo 3, § 3.4.2).



- **Ventilatori e sistema di distribuzione (Figura 3.10):** poiché il TLVS generalmente non può funzionare unicamente per convezione naturale (a meno di condizioni ambientali eccezionali), sono previsti ventilatori per aspirare o spingere l'aria attraverso il labirinto. In impianti di media/grande taglia, i ventilatori del TLVS fanno parte dell'unità di trattamento aria (UTA/AHU) dell'edificio: l'aria esterna, dopo aver attraversato il labirinto, giunge infatti alle UTA dove subisce eventuali ulteriori trattamenti (filtrazione fine, deumidificazione/umidificazione integrativa, etc.) prima di essere immessa negli ambienti (Marmion et al., 2012).
- **Sistemi di controllo e automazione (Figura 3.11):** Il TLVS può integrare sensori di temperatura, umidità e qualità dell'aria, oltre a valvole e serrande motorizzate. Un Building Management System (BMS) regola il funzionamento in base alle condizioni esterne, ai carichi interni e alla modalità operativa stagionale. Uno studio di Iannone et al. mostra come strategie di automazione avanzate possano ottimizzare le portate in base ai livelli di CO<sub>2</sub> e ad altre variabili ambientali; ne consegue che la progettazione del TLVS debba prevedere il controllo automatico per garantire prestazioni stabili nel tempo, massimizzando il comfort e minimizzando i consumi (Iannone et al., 2019).
- **Sistema di drenaggio della condensa (Figura 3.12):** componente spesso trascurato ma fondamentale. L'aria umida che viene raffreddata all'interno del labirinto tende a condensare parte del suo vapore acqueo sulle pareti più fredde. È indispensabile quindi prevedere pendenze nei pavimenti dei condotti e punti di raccolta dell'acqua (pozzetti, tubi di scarico) per evacuare la condensa in modo controllato. In assenza di un adeguato drenaggio, l'acqua potrebbe ristagnare causando problemi igienici e di corrosione (si veda Capitolo 3, § 3.4.2 e 3.4.3).

Dal punto di vista costruttivo, i labirinti termici sono realizzati tipicamente in calcestruzzo armato o mattoni pieni, materiali che assicurano elevata capacità termica e durabilità; materiali a massa elevata di origine naturale, come la terra cruda, risultano idonei per l'elevata inerzia e la capacità di assorbire/rilasciare calore in modo controllato, contribuendo al comfort termo-igrometrico (Wolenski et al., 2024).

La profondità di posa varia in genere tra 3 e 7 m, in funzione delle caratteristiche geotecniche e delle esigenze progettuali: l'influenza



**Figura 3.10** Schema di integrazione tra sistema di ventilazione meccanica e unità di trattamento aria (AHU). Fonte: Pfaffertott, J., Herkel, S., & Kalz, D. (2004). A study on the performance of earth-to-air heat exchangers and thermal labyrinths. *Energy and Buildings*, 36(4), 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.012>



**Figura 3.11** Sistema di gestione e controllo (BMS) per impianti HVAC. Fonte: Iannone, F., Ciampi, G., Rosato, A., & Sibilio, S. (2019). Optimization of HVAC control systems through advanced automation strategies. *Applied Energy*, 239, 1013–1025. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.040>



**Figura 3.12** Sistema di drenaggio della condensa nei condotti di ventilazione. Fonte: Santamouris, M. (2016). *Cooling of buildings: Passive and low-energy techniques*. Routledge

della variazione diurna tende a esaurirsi intorno a 1 m di profondità, mentre l'effetto delle condizioni atmosferiche si attenua sensibilmente oltre 6–7 m (Rim et al., 2018b).

Le dimensioni planimetriche tipiche oscillano tra 100 e 300 m<sup>2</sup> per edifici di piccola-media scala, con estensioni fino a 600 m<sup>2</sup> in edifici pubblici o accademici. Infine, il design del labirinto deve prevedere aperture e canali tali da facilitare l'ingresso dell'aria fresca e l'evacuazione dell'aria calda, ottimizzando il percorso e le perdite di carico; un'adeguata progettazione fluidodinamica riduce la dipendenza da sistemi di climatizzazione attivi e migliora l'efficienza complessiva dell'impianto (Gatto et al., 2021).

Un approccio innovativo è l'uso di masse termiche liquide all'interno del labirinto: Marmion et al. (2012) hanno studiato un "labirinto dinamico" in cui l'inerzia termica è affidata a moduli contenenti acqua, che possono essere raffreddati o riscaldati indipendentemente dal passaggio dell'aria. In quel caso, l'uso dell'acqua come mezzo di accumulo si è rivelato più flessibile e potenzialmente più economico rispetto alle sole pareti in calcestruzzo.

Tale soluzione permette di variare attivamente la temperatura della massa di accumulo, incrementando l'efficacia del labirinto in situazioni climatiche complesse. Sebbene queste sperimentazioni siano promettenti, nella maggior parte delle applicazioni reali attuali il calcestruzzo rimane il materiale principale, affiancato eventualmente da elementi metallici per le parti di collegamento ai canali aeraulici tradizionali o da pannellature coibentate dove serve isolare termicamente il labirinto da zone adiacenti dell'edificio. In ogni caso, è fondamentale che i materiali impiegati all'interno del TLVS siano duraturi in ambiente umido e non rilascino contaminanti: per questo il calcestruzzo, opportunamente additivato, è ideale (in quanto inerte e resistente alla formazione di muffe superficiali), mentre si evitano materiali organici o porosi all'interno del circuito d'aria. Anche le bocchette e i condotti metallici eventualmente connessi al labirinto devono essere in acciaio inossidabile o altro materiale resistente alla corrosione, dato che l'aria può essere carica di umidità condensata. Inoltre, per ragioni igieniche, tutte le superfici interne dovrebbero essere lisce e facilmente pulibili, o trattate con rivestimenti antimicrobici se necessario (si veda Capitolo 3, § 3.4.3).

### 3.3.3 Parametri di progettazione e dimensionamento

La definizione dei parametri di progetto di tale sistema è un passaggio fondamentale per garantire un corretto equilibrio tra prestazioni termiche, efficienza energetica e compatibilità architettonica.



Il dimensionamento del sistema deve considerare la geometria del labirinto, le condizioni termo-ambientali del sito, la domanda di ventilazione dell'edificio e gli obiettivi economici e funzionali del progetto. Sulla base dei dati raccolti da diversi casi studio internazionali (Marmion et al., 2012; S. Song et al., 2014; Rim et al., 2018b; Chiesa et al., 2019), i parametri chiave possono essere classificati in quattro categorie principali.

#### 3.3.3.1 Parametri fisico-tecnici

Questi parametri definiscono la configurazione geometrica e costruttiva del labirinto.

La lunghezza del percorso d'aria varia in genere tra 100 e 257 m, in funzione della potenza di scambio richiesta e del volume d'aria da trattare. La distanza tra le pareti si attesta mediamente intorno a 60 cm, garantendo un flusso d'aria uniforme e un buon coefficiente di scambio convettivo.

La profondità di posa del sistema oscilla tra 2 e 5 m, un intervallo che assicura la stabilità termica del suolo, dove la temperatura è meno influenzata dalle variazioni atmosferiche superficiali.

L'area della sezione trasversale varia tra 20 e 600 m<sup>2</sup>, in funzione della destinazione d'uso dell'edificio e delle portate richieste, che mediamente si collocano tra 2.200 e 7.400 m<sup>3</sup>/h. La velocità dell'aria nei canali varia tipicamente tra 0,3 e 3 m/s: valori inferiori migliorano lo scambio termico ma aumentano la perdita di carico e la necessità di ventilatori di supporto.

Lo spazio interrato richiesto varia tra 50 e 1.600 m<sup>2</sup>, a seconda della scala del progetto e della morfologia architettonica.

#### 3.3.3.2 Parametri termo-ambientali e prestazioni stagionali

Il comportamento termico del labirinto è influenzato dal microclima locale e dalle caratteristiche del terreno. La temperatura media del suolo si colloca generalmente tra 12 e 18 °C nelle aree temperate, permettendo un effetto di pre-raffrescamento estivo e di pre-riscaldamento invernale. Lo scambio termico medio varia tra 1–8 °C in estate e 2–6 °C in inverno, a seconda della lunghezza del percorso e della conduttività del terreno. Il sistema può anche contribuire alla deumidificazione o umidificazione dell'aria, con variazioni dell'umidità specifica comprese tra 0,8 e 1,8 g/kg. La conduttività termica del terreno oscilla tra 1,0 e 2,5 W/m·K, mentre la capacità termica volumetrica è compresa tra 1,5 e 2,5 MJ/m<sup>3</sup>·K. Le ventole ausiliarie, laddove presenti, hanno un'efficienza media del 60–70%, ma in con-

figurazioni ottimizzate possono raggiungere valori superiori.

#### 3.3.3.3 Parametri economici ed energetici

Sul piano energetico, i TLVS mostrano una riduzione del carico di raffrescamento compresa tra 20 e 40%, con un'efficienza energetica annuale globale dello stesso ordine (Marmion et al., 2012; S. Song et al., 2014). Il tempo di ritorno dell'investimento (payback) varia generalmente tra 5 e 10 anni, mentre la vita utile del sistema può superare i 40 anni, rendendo il labirinto competitivo rispetto ai sistemi HVAC convenzionali (Santamouris, 2005). I costi operativi annuali possono risultare ridotti fino a £34.000/anno nei grandi edifici pubblici, come dimostrato dal caso studio dell'ospedale di Vancouver e da Federation Square. Complessivamente, tali sistemi possono contribuire a un risparmio energetico complessivo tra 20 e 45% e a una diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> fino a 10–15 kg/m<sup>2</sup>·anno.

#### 3.3.3.4 Parametri funzionali e tipologici

I parametri funzionali riguardano la durabilità, la destinazione d'uso e l'integrazione del sistema con gli spazi architettonici. La durabilità media è stimata tra 30 e 50 anni, grazie all'uso di materiali ad alta massa termica come il calcestruzzo o la terra cruda (Wolenski et al., 2024). Il fabbricato tipo che meglio si presta all'integrazione di un TLVS è quello con ampie superfici interrato e flussi d'aria centralizzati, come scuole, università, musei e uffici pubblici (S. Song et al., 2014). Lo spazio minimo richiesto per l'installazione è compreso tra 50 e 150 m<sup>2</sup>, rendendo il sistema compatibile con strutture di media scala. Infine, i TLVS moderni sono spesso integrati con sistemi di automazione e controllo (BMS) che regolano portate, umidità e CO<sub>2</sub> interna, ottimizzando le prestazioni stagionali e riducendo l'impatto energetico complessivo (Iannone et al., 2019; Perez et al., 2021).

|                                                     | Parametri                              | Unità                | Range                                         |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|
| Parametri fisico-tecnici                            | Lunghezza del labirinto                | m                    | 100 – 257                                     |
|                                                     | Distanza tra pareti del labirinto      | cm                   | 60                                            |
|                                                     | Profondità di posa                     | m                    | 2 – 5                                         |
|                                                     | Area della sezione trasversale         | m <sup>2</sup>       | 20 – 600                                      |
|                                                     | Velocità del flusso d'aria             | m/s                  | 0.3 – 3                                       |
|                                                     | Portata aria                           | m <sup>3</sup> /h    | 2 200 – 7 400                                 |
|                                                     | Spazio interrato richiesto             | m <sup>2</sup>       | 50 – 1 600                                    |
| Parametri termo-ambientali e prestazioni stagionali | Scambio termico medio (estate)         | °C                   | 1–8                                           |
|                                                     | Scambio termico medio (inverno)        | °C                   | 2–6                                           |
|                                                     | Temperatura media del suolo            | °C                   | 12–18                                         |
|                                                     | Effetto di deumidificazione medio      | g/kgda               | 1–2                                           |
|                                                     | Effetto di umidificazione medio        | g/kgda               | 0.5–1                                         |
|                                                     | Deumidificazione / umidificazione      | g/kg                 | 0.8 – 1.8                                     |
|                                                     | Efficienza ventola                     | %                    | 60 – 70                                       |
|                                                     | Capacità termica del terreno           | MJ/m <sup>3</sup> ·K | 1.5–2.5                                       |
| Parametri economici ed energetici                   | Conduttività termica del terreno       | W/m·K                | 1.0–2.5                                       |
|                                                     | Efficienza energetica annuale          | %                    | 20 – 40                                       |
|                                                     | Riduzione del carico di raffrescamento | %                    | 20–40                                         |
|                                                     | Tempo di ritorno stimato               | anni                 | 7 – 20                                        |
|                                                     | Tempo di ritorno dell'investimento     | anni                 | 5–10                                          |
| Parametri funzionali e tipologici                   | Costi operativi annuali ridotti        | -                    | fino a £34.000/anno                           |
|                                                     | Durabilità del sistema                 | anni                 | 30 – 50                                       |
|                                                     | Spazio minimo richiesto                | m <sup>2</sup>       | 50–150                                        |
|                                                     | Tipo di edificio consigliato           | —                    | Edifici scolastici, uffici, musei, università |

*Tabella 3.2 Sintesi dei parametri progettuali e prestazionali di un sistema di ventilazione a labirinto termico (TLVS), articolati in categorie fisico-tecniche, termo-ambientali, energetico-economiche e funzionali, con relativi intervalli operativi di riferimento. Fonte: K. Mitrik*

## 3.4 Valenze e criticità operative del TLVS

### 3.4.1 Efficienza termica e prestazioni energetiche

Una delle principali qualità del sistema di ventilazione a labirinto termico (TLVS) risiede nella sua capacità di integrarsi senza impatti spaziali significativi, poiché l'infrastruttura viene installata nel sottosuolo, al di sotto del livello dell'edificio (Rim et al., 2018b; S. Song et al., 2014). Questa caratteristica ne consente l'inclusione già nelle prime fasi della progettazione architettonica in caso di nuove costruzioni, permettendo un'integrazione diretta con le fondazioni e con i sistemi impiantistici. In contesti di riqualificazione, il sistema può essere adattato a volumi ipogei preesistenti — come seminterrati, cavedi o locali tecnici — favorendo interventi non invasivi e potenzialmente reversibili, che mantengono la compatibilità con edifici esistenti senza alterarne la fruibilità in superficie. Dal punto di vista della capacità di pretrattamento termico, un labirinto ben progettato è in grado di abbattere sensibilmente la temperatura dell'aria esterna in ingresso d'estate e di elevarla apprezzabilmente in inverno, riducendo il salto termico che gli impianti HVAC devono colmare. Misure sperimentali condotte in Corea del Sud hanno rilevato che, nel caso del campus Ewha a Seoul, l'aria esterna in estate subisce un raffreddamento fino a 11,2 °C (valore massimo registrato a luglio) con un calo medio di circa 3,2 °C, mentre in inverno viene riscaldata fino a +24,8 °C (picco registrato a dicembre) con un aumento medio di 6,9 °C. Analogamente, il labirinto termico sotto la piazza di Federation Square è in grado di erogare aria all'atrio fino a ~12 °C più fredda dell'aria esterna nei periodi estivi estremi. Sul piano energetico, l'adozione di un TLVS si traduce in una consistente riduzione dei carichi termici che gravano sui sistemi di climatizzazione meccanica. Nel già citato studio di Song et al. relativo all'edificio universitario di Seoul, l'impiego del labirinto ha portato a riduzioni dei carichi di picco dell'aria esterna dell'ordine del 47,6% in raffreddamento (e deumidificazione) estivo e del 41,2% in riscaldamento (e umidificazione) invernale, rispetto a un caso identico senza labirinto. Su base annuale, questo si è tradotto in un

risparmio di energia per il condizionamento dell'aria esterna pari al 31,3% – un dato molto significativo, considerando che riguarda solo l'energia termica necessaria per il ricambio d'aria. Risultati analoghi emergono da altre applicazioni documentate. A Federation Square, grazie al labirinto termico, il carico di raffrescamento dell'atrio è stato ridotto di oltre il 90% rispetto a quello che avrebbe richiesto un sistema ad aria forzata meccanica tradizionale; persino confrontando con un moderno sistema di ventilazione meccanica a dislocamento (raffreddato), la riduzione del fabbisogno di raffreddamento è stata superiore al 40%.

In definitiva, l'efficienza termica dei labirinti ventilati è stata ampiamente dimostrata nei progetti monitorati: diminuzioni della temperatura dell'aria di rinnovo nell'ordine di 5–12 °C, riduzioni dei carichi termici del 30–50% e risparmi energetici annuali del 10–30% sono valori realisticamente ottenibili (Tab n.-). Tali numeri devono essere ovviamente contestualizzati al clima locale e al profilo di utilizzo dell'edificio, ma delineano chiaramente il potenziale del TLVS come strategia di ventilazione sostenibile.

*Tabella 3.3 Sintesi dei parametri progettuali e prestazionali di un sistema di ventilazione a labirinto termico (TLVS), articolati in categorie fisico-tecniche, termo-ambientali, energetico-economiche e funzionali, con relativi intervalli operativi di riferimento. Fonte: K. Mitrik*

| CASO STUDIO ANALIZZATO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Effetti di raffreddamento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Effetti di riscaldamento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Rendimento di ventilazione/Risparmio energetico/Costi                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ewha Campus Center</b><br>edificio situato nella Ewha Womans University in Corea del Sud<br>-Annual Energy Performance Evaluation of Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) Using Measured Data 2012<br>-Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy: A case study of an educational facility in South Korea 2014 (S.-Y. Song et al., 2012a, 2014)<br><b>Superficie:</b> L'edificio ha una superficie totale di 68,657 m <sup>2</sup> , con 6 piani sotterranei e 1 piano sopra il suolo.<br><b>Struttura:</b> Le pareti del centro sono costituite da due strati, e lo spazio tra le pareti viene utilizzato per il sistema del labirinto termico.<br><b>Struttura TLVS:</b> Il sistema è composto da un condotto orizzontale e un condotto verticale; il condotto orizzontale è lungo 288 metri e utilizza le pareti sotterranee per scambiare calore con l'ambiente geotermico.<br><b>Operatività TLVS:</b> I due condotti (orizzontale e verticale) operano in modo indipendente e sono controllati tramite una valvola di regolazione per gestire il flusso d'aria in base alle condizioni termiche esterne. | L'effetto di raffreddamento massimo registrato è stato di 11.2 °C (nel mese di luglio), mentre l'effetto di raffreddamento medio annuale è stato di 3.2 °C. L'effetto di deumidificazione annuale medio è stato di 1.8 g_w/kg_da. Le condizioni di deumidificazione si sono verificate per circa il 30.5% del tempo, con un massimo di 7.9 g_w/kg_da durante i mesi estivi. | L'effetto di riscaldamento massimo è stato di 24.8 °C (nel mese di dicembre), con un effetto di riscaldamento medio annuale di 6.9 °C. L'effetto di umidificazione annuale medio è stato di 0.8 g_w/kg_da, con il 69.5% del tempo in cui si è verificata l'umidificazione. Il massimo effetto di umidificazione durante i mesi invernali è stato di 3.6 g_w/kg_da. | Un tasso di raffreddamento medio annuale di 17.5 kW e un tasso massimo di 85.3 kW, che si è verificato nel mese di luglio. Un tasso di riscaldamento medio annuale di 22.5 kW e un tasso di umidificazione medio annuale di 10.0 kW.<br>-periodo di ammortamento: 12,1 anni |
| <b>Pacific NW Test Hospital</b><br>Large Dynamic Thermal Labyrinth: A Step Towards Net Zero Energy Use in Acute Care Hospitals (Marmion et al., 2012)<br>-Tipologia: ospedale<br>-Superficie: 50,000 m <sup>2</sup><br>-Serbatoi d'Acqua per il Labirinto:<br>Sono stati previsti 300 serbatoi interconnessi da 4 m <sup>3</sup> ciascuno, distribuiti in 30 cluster di 10 serbatoi. Questo è                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Durante l'estate, la temperatura media dell'aria in ingresso dall'impianto di raffreddamento è diminuita di 3.4 °C (6.1 °F), con un risparmio di circa 99 MWh/anno nel carico di raffreddamento                                                                                                                                                                             | L'analisi ha mostrato che, in condizioni esterne fredde, la temperatura media dell'aria in ingresso dal labirinto aumenta di 1.9 °C (3.5 °F), portando a un risparmio di circa 406 MWh/anno nel                                                                                                                                                                    | Risparmio energetico complessivo: 505MWh/anno, suddiviso in 406 MWh/anno per la riduzione dell'energia di preriscaldamento 99 MWh/anno per la                                                                                                                               |

ottimizzato per il bilanciamento del preriscaldamento in inverno e del preraffreddamento in estate.  
 Storage Water Tanks: È stato previsto l'uso di serbatoi d'acqua come media termico all'interno del labirinto, definiti in termini di dimensioni e connessioni per massimizzare l'efficienza del sistema, consentendo un flusso di acqua stratificato per riscaldamento e raffreddamento.  
 Altezza dei Piani:  
 L'altezza dei piani è stata ridotta a 3,6 metri grazie a un design che ha eliminato la necessità di quasi tutti i condotti orizzontali e delle relative sovrapposizioni, contribuendo così a costi di costruzione inferiori e aumentando la penetrazione della luce naturale.

preriscaldamento.

riduzione dell'energia di raffreddamento meccanico.

Riduzione dei costi operativi energetici: \$30.000 all'anno

#### Edificio ufficio situato a Incheon, Corea del Sud

Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption (Rim et al., 2018b)

-Tipologia di Edificio: ufficio

-Superficie totale: 605,55 m<sup>2</sup>.

-Sistema HVAC: L'edificio è dotato di un'unità di trattamento aria (AHU) integrata con il sistema di labirinto termico e un sistema di condizionamento tramite soffitto radiante.

-Requisiti di Ventilazione:

Ventilazione totale richiesta: 7400 m<sup>3</sup>/h.

Requisito min. di aria esterna: 2200 m<sup>3</sup>/h.

-Condizioni del Labirinto Termico:

Profondità del labirinto: 3 metri.

Area del labirinto: 412,68 m<sup>2</sup>.

Materiale: Calcestruzzo

-proprietà del suolo:

a\_conduttività termica: 1,3 W/m k

b\_calore specifico: 800 J/kg K

c\_densità: 1599 kg/m<sup>3</sup>

-proprietà del calcestruzzo:

a\_conduttività termica: 0,93 W/m k

b\_calore specifico: 653 J/kg K

c\_densità: 2300 kg/m<sup>3</sup>

Consumo energetico di raffreddamento [kwh]

-Senza labirinto termico: 557.966

-Con labirinto termico: 474.700

-Tasso di riduzione: 15%

L'effetto di raffreddamento massimo registrato è stato di 7.8 °C (3 agosto ore 12:00)

Consumo di energia per il riscaldamento [kwh]

-Senza labirinto termico: 400.754

-Con labirinto termico: 369.413

-Tasso di riduzione: 8%

-periodo di ammortamento:

26 anni

Consumo energetico

totale annuo [kwh]

-Senza labirinto termico: 958.721

-Con labirinto termico: 844.114

-Tasso di riduzione: 12%

-periodo di ammortamento:

9,9 anni

#### Centro Congressi in Algeria

Ottimizzazione della progettazione di edifici ad alta efficienza energetica mediante un labirinto termico sotterraneo (R. G. Annan & Nehme, 2016)

-Superficie totale: 4.721 m<sup>2</sup>

-Profondità: 7,3 m

-Flusso d'aria esterna: 37.000 l/s

-distanza media tra le pareti verticali in calcestruzzo: 4,7 m

Consumo energetico di raffreddamento [Mwh]

-Senza labirinto termico: 1692

-Con labirinto termico: 1489

-Tasso di riduzione: 12%

-Riduzione dei costi operativi energetici: \$16.324 all'anno

-periodo di ammortamento:

6 anni

### 3.4.2 Problematiche igrotermiche nei locali ipogei: condensa e ventilazione

Nei sistemi di ventilazione sotterranei, tra cui i TLVS e, più in generale, le tecnologie di scambio termico accoppiate al terreno, il controllo dell'umidità assume un ruolo determinante, poiché influenza simultaneamente le prestazioni energetiche, il comfort termo-igrometrico e la durabilità dei componenti edilizi. Gli ambienti interrati sono infatti caratterizzati da specifiche criticità igrotermiche, strettamente connesse al contatto diretto con il suolo e alla ridotta capacità di dissipare l'umidità accumulata, condizioni che possono alterare l'equilibrio termo-fisico del sistema e compromettere il comportamento prestazionale degli spazi confinati (Asphaug et al., 2020). Queste condizioni favoriscono il rischio di condensa sia superficiale sia interstiziale: l'aria interna calda e umida può condensare sulle superfici perimetrali più fredde, oppure all'interno degli strati costruttivi se il vapore migra e raggiunge zone a temperatura inferiore al punto di rugiada. In assenza di idonee strategie di controllo igrometrico, gli ambienti sotterranei tendono a manifestare condizioni di umidità relativa particolarmente elevate, frequentemente superiori all'80%, che favoriscono la formazione di fenomeni condensativi sulle superfici interne e l'innescio di processi di biodeterioramento, quali la proliferazione di muffe, come documentato da evidenze sperimentali. La letteratura scientifica evidenzia inoltre che, nelle prime fasi di esercizio, i livelli di umidità possono avvicinarsi alla saturazione, con valori tipicamente compresi tra il 90% e il 95%, determinando un contesto termo-igrometrico altamente critico e predisposto allo sviluppo di condensazione sia superficiale sia interstiziale (Zhang et al., 2017; Yang et al., 2022).

In particolare, la valutazione del rischio di condensazione non può essere limitata ai soli aspetti energetici, ma deve necessariamente includere un'analisi igrotermica conforme al quadro normativo vigente. La UNI EN ISO 13788:2013 fornisce il riferimento metodologico per la verifica delle condizioni di umidità superficiale interna e per la previsione della condensazione interstiziale, definendo criteri di calcolo basati sul confronto tra temperatura superficiale e temperatura di rugiada dell'aria ambiente (UNI EN ISO 13788, 2013). Tale approccio risulta particolarmente rilevante nei sistemi sotterranei, dove le superfici di scambio termico possono presentare temperature inferiori rispetto all'aria esterna introdotta nel periodo estivo, configurando condizioni potenzialmente critiche per la formazione di condensa. La norma stabilisce infatti che il rischio di condensazione superficiale si manifesta quando la temperatura superficiale

interna scende al di sotto della temperatura di rugiada, grandezza strettamente dipendente dal contenuto di vapore e dall'umidità relativa dell'aria. Nei contesti ipogei, caratterizzati da elevata inerzia termica e frequenti condizioni di umidità relativa elevata, tale verifica assume un ruolo centrale, poiché la presenza di fenomeni condensativi può compromettere non solo le prestazioni termo-fisiche del sistema, ma anche la qualità igienico-sanitaria degli ambienti e la durabilità dei materiali. L'applicazione dei criteri previsti dalla UNI EN ISO 13788 consente pertanto di inquadrare correttamente il comportamento igrotermico delle superfici e delle stratigrafie coinvolte, fornendo uno strumento essenziale per la progettazione affidabile dei sistemi di raffrescamento passivo basati sullo scambio termico con il terreno.

La verifica del rischio di condensazione superficiale si basa sul fattore di temperatura superficiale interna  $f_{Rsi}$ , espresso come:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

dove:

$\theta_{si}$  = temperatura superficiale interna [°C]

$\theta_i$  = temperatura dell'aria interna [°C]

$\theta_e$  = temperatura dell'aria esterna [°C]

Il parametro  $f_{Rsi}$  rappresenta un indicatore sintetico della qualità termo-igrometrica del nodo edilizio e consente di valutare la probabilità di raggiungimento dell'umidità relativa critica in prossimità delle superfici interne.

In assenza di dati di progetto o misure sperimentali, la norma propone una relazione semplificata:

$$n = 0,2 + 0,04 \cdot \theta_e \quad [h^{-1}]$$

dove:

$n$  = tasso di rinnovo dell'aria [ $h^{-1}$ ]

$\theta_e$  = temperatura esterna media mensile [°C]

Dal punto di vista fisico, la formulazione implica un incremento del tasso di ventilazione nei mesi caldi e una riduzione nei mesi freddi, in accordo con il comportamento tipico degli edifici ventilati naturalmente. Il rinnovo dell'aria assume un ruolo determinante nel controllo delle condizioni igrometriche interne, poiché contribuisce alla diluizione del vapore acqueo prodotto dagli occupanti e dalle attività interne, influenzando direttamente la pressione parziale di vapore e, conseguentemente, il rischio di condensazione superficiale e interstiziale.



Studi epidemiologici su edifici esistenti indicano che oltre la metà delle pareti controterra mostra segni di degrado da umidità (circa il 56% secondo rilievi in Finlandia), confermando che gli elementi a contatto con il suolo sono i più soggetti a danni di questo tipo (Fedorik et al., 2019). Le cause principali risiedono nel gradiente termico tra l'ambiente interno e il terreno, nelle infiltrazioni d'acqua e umidità dal suolo e nella ventilazione naturale insufficiente tipica dei vani interrati (Asphaug et al., 2020; Zhang et al., 2017). In particolare, la porzione interrata dell'involucro edilizio è costantemente esposta all'umidità del terreno (acqua meteorica infiltrata, falda e risalita capillare), richiedendo efficaci strategie di controllo per prevenire patologie come muffe, marcescenze del legno o corrosione delle armature (Asphaug et al., 2020). Se non affrontati in modo sistemico, questi fenomeni portano a un degrado delle prestazioni termoigrometriche e a condizioni igienico-sanitarie sfavorevoli per gli occupanti degli spazi interrati (S.-Y. Song et al., 2014; Mihalakakou et al., 2022; Rahiminejad et al., 2024).

Gli studi più recenti sull'analisi igrotermica dei sistemi di ventilazione interrati indicano che il rischio di condensa dipende principalmente da tre fattori: temperatura del suolo, velocità dell'aria nel condotto e rapporto tra superficie e volume del labirinto (Zhou et al., 2023). Se la velocità del flusso è troppo bassa, l'aria tende a saturarsi localmente, favorendo l'accumulo di condensa; se è troppo elevata, invece, lo scambio termico si riduce e il sistema perde efficacia. Per contrastare tali fenomeni, la ricerca propone diverse strategie progettuali di mitigazione.

Tra queste, la più diffusa è l'introduzione di sistemi di drenaggio e pendenze controllate alla base dei canali del labirinto, per consentire la raccolta e lo smaltimento dell'acqua condensata senza comprometterne le prestazioni. Inoltre, l'impiego di materiali ad alta permeabilità al vapore e con finiture antimicrobiche può ridurre la possibilità di ristagni e proliferazioni batteriche. Recenti studi condotti su sistemi di ventilazione ipogei in climi temperati hanno dimostrato che l'uso di rivestimenti porosi e igroscopici sulle superfici interne del labirinto consente di assorbire temporaneamente l'umidità e rilasciarla gradualmente, stabilizzando le condizioni igrometriche.

Questo principio è simile a quello applicato nei "breathing walls", dove i materiali fungono da buffer igroscopici, riducendo il rischio di condensa anche in presenza di variazioni rapide dell'umidità relativa (Di Giuseppe & D'Orazio, 2016). Un'altra best practice emersa dalla letteratura è la modulazione stagionale del flusso d'aria nel TLVS. Durante l'estate, è consigliabile limitare l'afflusso nelle ore

più calde, quando la differenza termoigrometrica tra aria esterna e terreno è minore, e privilegiare la ventilazione notturna, sfruttando la temperatura più bassa del suolo e dell'aria esterna per ridurre la saturazione del flusso (Santamouris, 2018). Tale strategia, già impiegata in edifici bioclimatici con labirinti dinamici, consente di minimizzare i periodi di rischio di condensazione attiva. In inverno, al contrario, l'aria più fredda e secca può causare un gradiente igrometrico inverso, con potenziale essiccamento e fessurazione dei materiali del condotto; in questo caso, è opportuno controllare la portata e mantenere una temperatura minima del flusso d'aria per evitare il superamento del punto di rugiada interno (G. R. Annan & Nehme, 2016).

Le simulazioni termoigrometriche dinamiche si sono rivelate strumenti fondamentali per prevenire tali criticità in fase progettuale. L'utilizzo di modelli numerici avanzati, come WUFI® o EnergyPlus, permette di stimare i profili di temperatura e umidità lungo il percorso del labirinto e di verificare il rischio di condensazione in funzione delle condizioni climatiche locali e dei materiali impiegati. Ad esempio, un'analisi condotta su un TLVS in Corea del Sud ha mostrato che l'adozione di un controllo automatico delle serrande di ingresso e la variazione della velocità dei ventilatori in base al tasso di umidità esterna consentono di ridurre del 60% gli episodi di condensa interna (Rim et al., 2018b).

Inoltre, il controllo passivo può essere supportato da sensori igrometrici a basso consumo, integrati nel sistema di Building Management System (BMS), per monitorare in continuo le condizioni di umidità e temperatura nei condotti (Gatto et al., 2021).

Tra le buone pratiche costruttive più citate emergono:

- l'inserimento di strati isolanti esterni per mantenere costante la temperatura delle pareti del labirinto e ridurre il rischio di raffreddamento localizzato;
- la realizzazione di canali con sezione variabile per favorire il rimescolamento dell'aria e ridurre la formazione di zone a stagnazione di vapore;
- l'uso di materiali a elevata capacità termica (come il calcestruzzo armato o la terra cruda stabilizzata) che, oltre a smorzare le variazioni termiche, contribuiscono a bilanciare il contenuto di umidità (Wolenski et al., 2024).

### 3.4.3 Gestione igienico-sanitaria e controllo batteriologico

Un altro aspetto importante da considerare riguarda la creazione di condizioni favorevoli alla proliferazione microbica, alla formazione di biofilm e alla diffusione di particolato o composti organici volatili<sup>1</sup> (COV o VOC) all'interno del sistema di ventilazione. Tali fenomeni, se trascurati, compromettono non solo la salubrità dell'aria immessa ma anche la durabilità delle superfici interrate, causando degrado dei materiali e incremento dei costi di manutenzione.

Il beneficio energetico (smorzamento della temperatura di presa aria) è inseparabile da un potenziale effetto collaterale: raffreddare aria calda-umida può portare la superficie interna del condotto sotto il punto di rugiada, generando condensa. La presenza di condensa, soprattutto quando associata all'accumulo di polveri e sostanze nutrienti sulle superfici, favorisce e accelera i processi di formazione di biofilm. In ambito HVAC, la letteratura tecnico-scientifica riconosce che i fenomeni di condensazione, uniti al deposito di contaminanti in condizioni di umidità, costituiscono uno dei principali fattori che innescano la proliferazione microbiologica. Tale dinamica, oltre a compromettere le condizioni igieniche del sistema, può determinare il rilascio di aerosol contenenti microrganismi, configurando un meccanismo di degrado che interessa simultaneamente gli aspetti sanitari, prestazionali e di qualità dell'aria indoor delle unità aerauliche (Gorlach et al., 2025).

Dal punto di vista batteriologico, i rischi attesi includono:

- muffe e funghi filamentosi (spore aerodisperse) che colonizzano superfici umide e depositi; nella letteratura su contaminazione microbica indoor si citano frequentemente generi come *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Alternaria* per potenziali impatti allergenici/patogeni.
- batteri ambientali e, in casi particolari, batteri opportunisti/antibiotico-resistenti associati a biofilm e depositi in componenti HVAC; studi di sintesi recenti sottolineano l'esigenza di metodi di campionamento e valutazione standardizzati e richiamano la criticità di filtri, batterie e vaschette condensa come "hot spot" di crescita.
- *Legionella*: il rischio è direttamente legato a sistemi a acqua aerosolizzabile (torri evaporative, umidificatori, raffreddatori evaporativi, reti idriche complesse) più che ai soli condotti

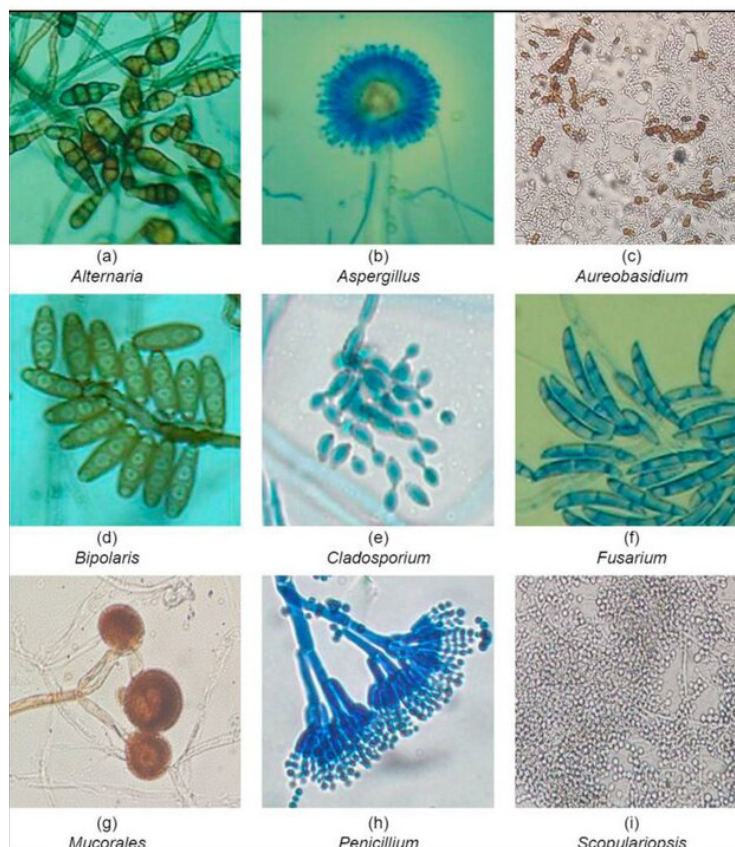
1. I composti organici volatili (COV o Volatile Organic Compounds (VOC), in ambito edilizio e ambientale, rivestono particolare rilevanza poiché possono essere emessi da numerose sorgenti indoor ed outdoor, tra cui materiali da costruzione, prodotti vernicianti, adesivi, arredi, processi di combustione e attività antropiche. La loro presenza negli ambienti confinati è oggetto di attenzione scientifica e normativa in quanto alcuni VOC possono influenzare la qualità dell'aria interna (IAQ) e, in funzione della concentrazione e della natura chimica, determinare effetti irritativi, tossicologici o di discomfort per gli occupanti.

2. La norma ASHRAE 188 definisce requisiti minimi per la gestione del rischio legionellosi nei sistemi idrici di edificio, imponendo logiche di “building survey” e water management program (misure preventive, progettazione/commissioning, documentazione e controlli). La Guideline 12 fornisce guida applicativa e discute aree di rischio tipiche (acqua potabile, fontane decorative, spa, torri di raffreddamento, umidificatori, ecc.).

aria-terreno; tuttavia, in architetture ibride che includono raccolta e stoccaggio di condensa o componenti con acqua stagnante, la gestione deve dialogare con i principi di risk management per sistemi idrici (ASHRAE 188, 2021)<sup>2</sup>.

La gestione igienico-sanitaria e il controllo batteriologico dei TLVS richiedono un approccio integrato, che combini scelte progettuali, regolazione passiva del microclima e strategie di monitoraggio. Quando adeguatamente progettati e gestiti, i sistemi a labirinto termico possono garantire condizioni di elevata qualità dell’aria anche in ambienti interrati, preservando al contempo la filosofia low-energy che ne costituisce il principio fondante. Le esperienze applicative evidenziano come la sinergia tra inerzia termica del terreno, ventilazione naturale controllata e corretta gestione delle superfici rappresenti una strategia particolarmente efficace per mantenere la stabilità igienica del sistema nel lungo periodo, limitando il ricorso a

*Figura 3.13* Micrografie ottiche delle principali muffe aerodisperse di interesse per la qualità dell’aria indoor: *Alternaria* (a), *Aspergillus* (b), *Cladosporium* (e) e *Penicillium* (h). Le immagini evidenziano le caratteristiche morfologiche distintive dei conidi e delle strutture sporali, comunemente utilizzate per l’identificazione microscopica dei generi fungini più frequentemente riscontrati negli ambienti confinati e nei sistemi di ventilazione. Fonte: ResearchGate – Multi-Convolutional Neural Network-Based Diagnostic Software for the Presumptive Determination of Non-Dermatophyte Molds (Milanović et al., 2023)



trattamenti chimici o interventi manutentivi invasivi. Un microambiente ventilato e caratterizzato da condizioni termo-igrometriche stabili contribuisce infatti a ridurre la probabilità di proliferazione microbica.

L'inerzia termica del suolo, unitamente a una regolazione appropriata delle portate d'aria, può favorire il mantenimento dell'umidità relativa entro soglie compatibili con la prevenzione dei fenomeni di condensazione e biodeterioramento, ostacolando la sopravvivenza dei microrganismi patogeni (Rim et al., 2018b). In tale prospettiva, la ventilazione periodica, in particolare nelle ore notturne, assume un ruolo rilevante, poiché promuove l'asciugatura delle superfici interne e limita la persistenza di condizioni di saturazione.

Analogamente, configurazioni geometriche dei canali che evitino zone di ristagno o scarsa movimentazione dell'aria possono contribuire a migliorare la qualità del flusso ventilativo, riducendo l'accumulo di contaminanti e la potenziale diffusione batterica. Un elemento essenziale per la salvaguardia delle condizioni igienico-sanitarie è rappresentato dalla manutenzione programmata. Sebbene il TLVS sia concepito come un sistema a bassa necessità manutentiva, le best practice raccomandano verifiche periodiche e ispezioni visive, eventualmente supportate da dispositivi diagnostici e sensori ambientali integrati nei sistemi di gestione dell'edificio (Building Management System).

Il monitoraggio continuo di parametri quali temperatura, umidità relativa e concentrazione di CO<sub>2</sub> consente infatti di individuare precocemente eventuali condizioni anomale, riducendo il rischio di degrado igienico (Gatto et al., 2021). In ambito sperimentale, sono state inoltre investigate soluzioni di controllo avanzato basate su tecniche di rilevamento bio-ottico e strategie di sanificazione a basso impatto energetico, compatibili con la logica passiva del sistema. In particolare, Annan e Nehme (2016) hanno esplorato l'impiego di sensori bio-ottici per l'individuazione precoce di colonie microbiche nelle canalizzazioni, integrando tecnologie di sanificazione a bassa energia, quali la fotocatalisi UV-A e sistemi di nebulizzazione controllata a base di ozono, attivabili selettivamente e senza alterare il principio di funzionamento passivo del sistema (G. R. Annan & Nehme, 2016).

## 3.5 Aspetti economici e gestionali

### 3.5.1 Costi, tempi realizzativi e di ammortamento

Nel contesto della valutazione dell'efficacia e della sostenibilità dei sistemi di ventilazione passiva ipogea, la stima dei tempi di ammortamento rappresenta un indicatore chiave per determinarne la reale applicabilità nel settore edilizio terziario. Il sistema di ventilazione a labirinto termico (TLVS), pur comportando un investimento iniziale superiore rispetto a soluzioni convenzionali, mostra nel medio-lungo termine un potenziale di rientro economico giustificato dai risparmi energetici generati durante l'esercizio. Secondo quanto evidenziato dallo studio di Rim et al. (2018) e Song et al. (2014), il TLVS installato in un edificio per uffici ha permesso di ridurre sensibilmente il fabbisogno energetico per il raffrescamento estivo, contribuendo al tempo stesso a migliorare le condizioni di comfort interno. In tale contesto, il periodo di ammortamento semplice è stato calcolato rapportando l'incremento dei costi di costruzione con il risparmio energetico annuale ottenuto.

I risultati del primo indicano un range di rientro compreso tra 10 e 15 anni, che si colloca in una fascia di accettabilità in linea con molte tecnologie ad alta efficienza energetica attualmente in uso, mentre il secondo varia tra i 12 e i 14 anni, rendendolo una soluzione economicamente vantaggiosa per edifici in climi estremi. Il periodo di ammortamento per l'implementazione del sistema di ventilazione a labirinto termico è stato calcolato in 14,2 anni in uno studio, mentre un altro studio ha riportato un periodo di ammortamento di 12,1 anni. Queste variazioni possono dipendere da fattori specifici del sito e dalle condizioni operative.

Tuttavia, è importante osservare che il calcolo del payback time, sebbene utile come prima valutazione, non tiene conto di benefici indiretti spesso rilevanti nel caso dei TLVS. Tra questi si annoverano la maggiore resilienza climatica degli edifici, la riduzione della domanda di picco elettrico, il minor utilizzo di componenti meccanici soggetti a manutenzione, e il miglioramento della qualità dell'aria interna (IAQ), con effetti positivi anche sul benessere e la produt-

tività degli occupanti. Inoltre, in contesti di nuova costruzione, l'integrazione del sistema all'interno del layout strutturale e impiantistico, specialmente se pianificata in fase progettuale, consente di contenere significativamente i costi aggiuntivi, mentre negli interventi di retrofit si può valutare la riconversione di spazi tecnici o seminterrati esistenti.

La flessibilità del sistema, unita ai benefici energetici e ambientali, rende dunque il TLVS una tecnologia passiva con potenziale di replicabilità elevato, se supportata da un'adeguata pianificazione e valutazione tecnico-economica.



## References

- Al Martini, S., Khartabil, A., & Sabouni, R. (2023). Evaluation of Thermal Conductivity of Sustainable Concrete Having Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Recycled Aggregate (RCA) Using Needle Probe Test. *Sustainability*, 15(1), 109. <https://doi.org/10.3390/su15010109>
- Annan, G. R., & Nehme, B. A. (2016). Energy Efficient Building Design Optimization Using an Underground Thermal Labyrinth. In *SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENT BUILDING DESIGN: MATERIALS AND HVAC EQUIPMENT TECHNOLOGIES* (pp. 162–167). AMER SOC HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGS.
- Annan, R. G., & Nehme, B. A. (2016). Ottimizzazione della progettazione di edifici ad alta efficienza energetica mediante un labirinto termico sotterraneo. [https://store.accuristech.com/standards/energy-efficient-building-design-optimization-using-an-underground-thermal-labyrinth?product\\_id=1929536&srsId=AfmBOopnf-DSyKj2P2z4RM7aFu0mEXt4OllfU6jjeHYmnlFwldoyTAC1#product](https://store.accuristech.com/standards/energy-efficient-building-design-optimization-using-an-underground-thermal-labyrinth?product_id=1929536&srsId=AfmBOopnf-DSyKj2P2z4RM7aFu0mEXt4OllfU6jjeHYmnlFwldoyTAC1#product)
- ASHRAE 188. (2021). ASHRAE 188-2021 | ASHRAE Store. [https://store.accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-188-2021?product\\_id=2229689](https://store.accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-188-2021?product_id=2229689)
- Asphaug, S. K., Kvande, T., Time, B., Peuhkuri, R. H., Kalamees, T., Johansson, P., Berardi, U., & Lohne, J. (2020). Moisture control strategies of habitable basements in cold climates. *Building and Environment*, 169, 106572. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106572>
- Chiesa, G., Acquaviva, A., Grosso, M., Bottaccioli, L., Floridia, M., Pristeri, E., & Sanna, E. M. (2019). Parametric Optimization of Window-to-Wall Ratio for Passive Buildings Adopting A Scripting Methodology to Dynamic-Energy Simulation. In *SUSTAINABILITY* (Vol. 11, Fascicolo 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su11113078>
- Daza-Badilla, L., Gómez, R., Díaz-Noriega, R., Skrzypkowski, K., Avudaiappan, S., Saavedra-Flores, E. I., & Korzeniowski, W. (2024). Thermal Conductivity in Concrete Samples with Natural and Synthetic Fibers. <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/4/817>
- Di Giuseppe, E., & D'Orazio, M. (2016). Experimental and numerical assessment of breathing walls performance for the improvement of air quality and comfort indoors – TEMA. <https://rivistatema.com/experimental-and-numerical-assessment-of-breathing-walls-performance-for-theimprovement-of-air-quality-and-comfort-indoors/>
- Fedorik, F., Heiskanen, R., Laukkarinen, A., & Vinha, J. (2019). Impacts of multiple refurbishment strategies on hygrothermal behaviour of basement walls. *Journal of Building Engineering*, 26, 100902. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100902>
- Gatto, G., Quaquero, E., Villa, V., Di Giuda, G. M., Tagliabue, L. C., Ciribini, A. L. C., Sanna, A., & Desogus, G. (2021). Information modeling for the monitoring of existing buildings' indoor comfort – TEMA. <https://rivistatema.com/information-modeling-for-the-monitoring-of-existing-buildings-indoor-comfort/>



- Gorlach, J., Gazda, D., Trusz, A., Walaszczyk, J., Szczeńiak, S., & Piekarska, K. (2025). Ventilation and air conditioning systems are a source of antibiotic-resistant bacteria—A review. *Building and Environment*, 271, 112583. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112583>
- Grosso, M. (2008). Il raffrescamento passivo degli edifici—II edizione. <https://www.maggiolieditore.it/il-raffrescamento-passivo-degli-edifici-iv-edizione.html>
- Iannone, F., Carbonara, G., D'Elia, M., Dell'Osso, G. R., & Rinaldi, A. (2019). Building automation system to control natural ventilation in school buildings. The case study of “Michelangelo School” in Bari – TEMA. <https://rivistatema.com/building-automation-system-to-control-natural-ventilation-in-school-buildings-the-case-study-of-michelangelo-school-in-bari/>
- Lattieff, F. A., Atiya, M. A., Lateef, R. A., Dulaimi, A., Jweeg, M. J., Abed, A. M., Mahdi, J. M., & Talebi-zadehsardari, P. (2022). Thermal analysis of horizontal earth-air heat exchangers in a subtropical climate: An experimental study. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.981946>
- Marmion, P., Pradinuk, R., Woods, A., Guity, A., Rehmanji, I., & Hydro, B. (2012). Large Dynamic Thermal Labyrinth: A Step Towards Net Zero Energy Use in Acute Care Hospitals.
- Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Halkos, G., Paravantis, J., Makridis, S., & Papaefthimiou, S. (2022). Applications of earth-to-air heat exchangers: A holistic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111921>
- Milanović, M., Otašević, S., Randelovic, M., Grassi, A., Cafarchia, C., Mares, M., & Milosavljevic, A. (2023). (PDF) Multi-Convolutional Neural Network-Based Diagnostic Software for the Presumptive Determination of Non-Dermatophyte Molds. [https://www.researchgate.net/publication/377901827\\_Multi-Convolutional\\_Neural\\_Network-Based\\_Diagnostic\\_Software\\_for\\_the\\_Presumptive\\_Determination\\_of\\_Non-Dermatophyte\\_Molds](https://www.researchgate.net/publication/377901827_Multi-Convolutional_Neural_Network-Based_Diagnostic_Software_for_the_Presumptive_Determination_of_Non-Dermatophyte_Molds)
- Pardeshi, V., Nimbalkar, S., & Khabbaz, H. (2020). Field Assessment of Gravel Loss on Unsealed Roads in Australia. *Frontiers in Built Environment*, 6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00003>
- Perez, R. E., Cortes-Molina, M., & Navarro-Gonzalez, F. J. (2021). Analysis of Rainfall Time Series with Application to Calculation of Return Periods. In *SUSTAINABILITY* (Vol. 13, Fascicolo 14). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su13148051>
- Rahiminejad, M., Ghazi Wakili, K., Barat, A., & Renfer, C. (2024). Hygrothermal Performance Analysis of Wooden Basements under Critical Conditions. *Buildings*, 14(7), 2222. <https://doi.org/10.3390/buildings14072222>
- Rim, M., Sung, U.-J., & Kim, T. (2018a). Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption. *Energies*, 11, 2762. <https://doi.org/10.3390/en11102762>
- Rim, M., Sung, U.-J., & Kim, T. (2018b). Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption. *Energies*, 11(10), 2762. <https://doi.org/10.3390/en11102762>
- Santamouris. (2018). Minimizing Energy Consumption, Energy Poverty and Global and Local Climate Change in the Built Environment: Innovating to Zero. <https://shop.elsevier.com/books/minimizing-energy-consumption-energy-poverty-and-global-and-local-climate-change-in-the-built-environment-innovating-to-zero/santamouris/978-0-12-811417-9>
- Santamouris, M. (2005). Passive cooling of buildings. *KGH – Klimatizacija grejanje hlađenje*, 34.
- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>

- Seppänen, O. A., & Fisk, W. (2006). Some Quantitative Relations between Indoor Environmental Quality and Work Performance or Health. *HVAC&R Research*, 12(4), 957–973. <https://doi.org/10.1080/10789669.2006.10391446>
- Song, S., Han Lim, J., & Hee Song, J. (2014). Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy: A case study of an educational facility in South Korea | Request PDF. [https://www.researchgate.net/publication/265909378\\_Effectiveness\\_of\\_a\\_thermal\\_labyrinth\\_ventilation\\_system\\_using\\_geothermal\\_energy\\_A\\_case\\_study\\_of\\_an\\_educational\\_facility\\_in\\_South\\_Korea?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ](https://www.researchgate.net/publication/265909378_Effectiveness_of_a_thermal_labyrinth_ventilation_system_using_geothermal_energy_A_case_study_of_an_educational_facility_in_South_Korea?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ)
- Song, S.-Y., Song, J.-H., & Lim, J.-H. (2012a). Annual Energy Performance Evaluation of Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) Using Measured Data.
- Song, S.-Y., Song, J.-H., & Lim, J.-H. (2012b). Annual energy performance evaluation of thermal labyrinth ventilation system (TLVS) using measured data | Request PDF. [https://www.researchgate.net/publication/289296515\\_Annual\\_energy\\_performance\\_evaluation\\_of\\_thermal\\_labyrinth\\_ventilation\\_system\\_TLVS\\_using\\_measured\\_data?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ](https://www.researchgate.net/publication/289296515_Annual_energy_performance_evaluation_of_thermal_labyrinth_ventilation_system_TLVS_using_measured_data?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ)
- Song, S.-Y., Song, J.-H., & Lim, J.-H. (2014). Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy: A case study of an educational facility in South Korea. *Energy for Sustainable Development*, 23, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.07.008>
- UNI EN ISO 13788. (2013). UNI EN ISO 13788:2013—UNI Ente Italiano di Normazione—Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia—Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale—Metodi di calcolo. <https://store.uni.com/uni-en-iso-13788-2013>
- Wolenski, A. R. V., Frare, A., De Lima, J. E. M., Poltronieri, E. T., & Da Silva, T. C. A. (2024). Estudo de viabilidade técnica de Solos para paredes em Taipa de Pilao, Soils Technical Feasibility Study for Walls in Rammed Earth. *ENSUS 2024 - XII Encontro de Sustentabilidade em Projeto*, 786–795. <https://doi.org/10.29183/2596-237x.ensus2024.v12.n1.p786-795>
- Yang, B., Yao, H., & Wang, F. (2022). A Review of Ventilation and Environmental Control of Underground Spaces. *Energies*, 15(2), 409. <https://doi.org/10.3390/en15020409>
- Zhang, H., Liu, J., Li, C., & Lian, Z. (2017). Long-term investigation of moisture environment in underground civil air defence work. <https://doi.org/10.1177/1420326X16637658>
- Zhou, X., Wang, D., Liu, Y., Luo, M., Hooshmand, S. M., & Wagner, A. (2023). Developing a Practical Thermal Performance Index for Radiant Terminals-Structural Thermal Resistance. In *BUILDINGS* (Vol. 13, Fascicolo 12). <https://doi.org/10.3390/buildings13122938>



#### *ABSTRACT (INGLESE)*

*Chapter 4 translates the theoretical and performance framework previously outlined into an empirical and comparative dimension, developing an evaluative and interpretative analysis of international case studies selected for their representativeness, quality of documentation, and technological relevance. The objective is not merely to describe exemplary projects, but to define a methodological framework capable of interpreting the TLVS as a replicable, measurable, and context-sensitive architectural technology. In continuity with Chapter 3, the TLVS is understood as a passive thermo-environmental infrastructure based on the interaction between thermal mass, airflow dynamics, and ground inertia, whose effectiveness depends on the coherence between spatial configuration, climatic conditions, and integration with building services systems. The analytical structure is based on a heterogeneous sample of buildings differentiated by function, scale, and geographic location, including educational, university, museum, office, and healthcare facilities. This diversification moves beyond a narrowly typological view of the system, highlighting its application flexibility and capacity to adapt to different climatic regimes. The analysis shows that the performance of the thermal labyrinth cannot be reduced to standardized metrics, but rather emerges from the dynamic interaction among ground temperature, diurnal temperature swings, internal loads, and ventilation strategies. A central element of the chapter is the development of research output analysis sheets, conceived as tools for data normalization and comparison. Their dual structure—climatic-environmental context and technological-performance configuration—makes it possible to connect microclimatic parameters, design choices, and energy outcomes. Variables often overlooked, such as soil temperature, duct geometry, surface roughness, and integration with active systems, prove to be decisive, underscoring the hybrid nature of the TLVS. Comparative evidence indicates significant attenuation of ventilation air temperature fluctuations, with temperature differences generally ranging between 2 and 8 °C and reductions in energy loads that, in the most virtuous cases, exceed 30–40%. In integrated configurations, the TLVS contributes to comfort stabilization and peak load mitigation. The heterogeneity of the available data ultimately reveals a methodological limitation in the evaluation of passive technologies, reinforcing the need for shared metrics and transferable design criteria, particularly in Mediterranean climatic contexts.*

## CAPITOLO 4 ANALISI DEI CASI STUDI: Progetti e Sistemi applicativi del TLVS

### ABSTRACT

Il Capitolo 4 trasferisce il quadro teorico e prestazionale delineato in precedenza in una dimensione empirica e comparativa, costruendo un'analisi valutativo-interpretativa di casi studio internazionali selezionati per rappresentatività, qualità documentale e rilevanza tecnologica. L'obiettivo non è la semplice descrizione di opere esemplari, ma la definizione di un impianto metodologico capace di leggere il TLVS come tecnologia architettonica replicabile, misurabile e contestualizzabile. In continuità con il Capitolo 3, il TLVS è interpretato come infrastruttura termo-ambientale passiva fondata sull'interazione tra massa termica, dinamica dei flussi d'aria e inerzia del sottosuolo, la cui efficacia dipende dalla coerenza tra configurazione spaziale, condizioni climatiche e integrazione impiantistica. La struttura analitica si basa su un campione eterogeneo di edifici per funzione, scala e localizzazione geografica, comprendente contesti educativi, universitari, museali, direzionali e sanitari. Tale diversificazione supera una visione tipologica ristretta del sistema, evidenziandone la flessibilità applicativa e la capacità di adattamento a regimi climatici differenti. L'analisi mostra come il comportamento del labirinto termico non sia riconducibile a prestazioni standardizzate, ma emerga dall'interazione dinamica tra temperatura del suolo, escursioni diurne, carichi interni e strategie di ventilazione. Elemento centrale del capitolo è la costruzione di schede di analisi di Output della ricerca, concepite come strumenti di normalizzazione e comparazione dei dati. La doppia articolazione, contesto climatico-ambientale e configurazione tecnologico-prestazionale, consente di connettere parametri microclimatici, scelte progettuali e risultati energetici. Variabili spesso trascurate, quali temperatura del terreno, geometria dei condotti, rugosità delle superfici e integrazione con sistemi attivi, assumono un ruolo determinante, evidenziando la natura ibrida del TLVS. Le evidenze comparative indicano attenuazioni significative delle oscillazioni termiche dell'aria di ventilazione, con differenze di temperatura generalmente comprese tra 2 e 8 °C e riduzioni dei carichi energetici che nei casi più virtuosi superano il 30-40%. In configurazioni integrate, il TLVS contribuisce alla stabilizzazione del comfort e alla mitigazione dei picchi. La disomogeneità dei dati disponibili rivela infine una criticità metodologica nella valutazione delle tecnologie passive, rafforzando la necessità di metriche condivise e criteri progettuali trasferibili, in particolare nei contesti climatici mediterranei.



## 4.1 Criteri di selezione, metodologia e introduzione alla schedatura dei casi di studio

Il presente capitolo è dedicato all'analisi valutativo-interpretativa di casi studio riferiti ad interventi di nuova costruzione, selezionati per approfondire il ruolo e l'efficacia del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) e delle sue possibili integrazioni con altri dispositivi bioclimatici. L'obiettivo è la costruzione di un quadro metodologico utile a definire indirizzi e strategie per la progettazione tecnologica ambientale, a partire da esperienze reali già realizzate o in fase di realizzazione a destinazione pubblica e, in modo specifico, al settore terziario, ritenuto particolarmente significativo per l'indagine sulle tecnologie oggetto di ricerca. I casi selezionati derivano da un processo di raccolta e sistematizzazione di un insieme più ampio di esperienze di 100 casi di studio, esplorate attraverso una ricerca che ha integrato fonti eterogenee, pubblicazioni scientifiche, report nazionali e internazionali, documentazione tecnica specialistica e informazioni fornite direttamente dai progettisti, con l'obiettivo di costruire una base conoscitiva ampia e solida.

Metodologicamente la ricerca si è articolata in quattro fasi principali, che hanno richiesto una verifica costante dei passaggi:

### Prima fase – Raccolta dei casi studio

Attraverso un'analisi sistematica della letteratura scientifica, di pubblicazioni tecniche e di documentazione progettuale, sono stati individuati 100 edifici, sia nazionali sia internazionali, appartenenti a diverse tipologie funzionali (terziarie, culturali, universitarie etc). La selezione iniziale è stata guidata dalla presenza più in generale, dall'integrazione di strategie bioclimatiche orientate al raffrescamento passivo. Questa fase ha consentito di costruire un repertorio ampio e articolato, utile a delineare la diffusione di tali sistemi e le differenti modalità applicative in contesti climatici e architettonici eterogenei.

### Seconda fase – Costruzione del quadro di analisi

A partire dal campione preliminare, è stato definito un impianto interpretativo capace di leggere in modo comparabile i casi selezionati. L'attenzione non si è limitata alla mera presenza del TLVS, ma si è estesa alle modalità di integrazione con altri dispositivi ambientali, quali sistemi di raffrescamento evaporativo, torri di ventilazione ed atri bioclimatici. In questa fase è stato quindi strutturato un sistema di categorie analitiche volto a mettere in relazione il contesto climatico, la configurazione architettonica e le prestazioni ambientali, con l'obiettivo di superare una lettura puramente descrittiva e orientare l'indagine verso una valutazione critica e comparativa.

### Terza fase – Selezione ristretta e approfondimento

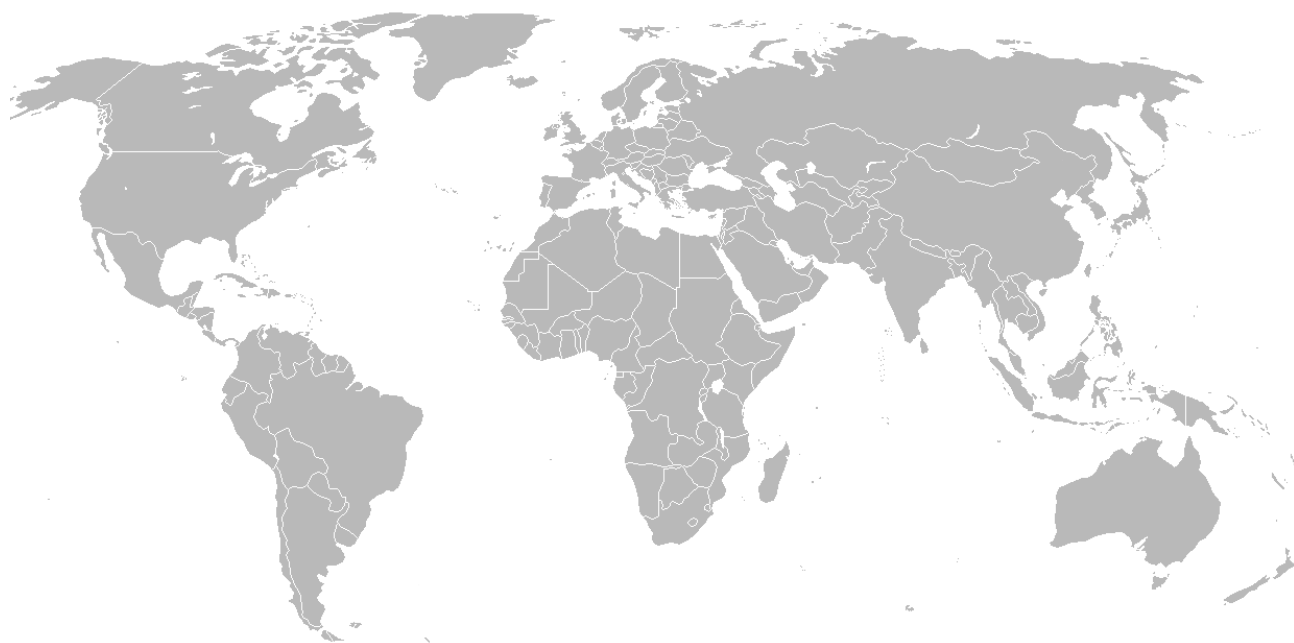
Sono stati privilegiati gli edifici per i quali fosse reperibile una documentazione tecnica sufficientemente dettagliata, comprensiva di dati prestazionali misurati o simulati, nonché di informazioni utili a comprendere il funzionamento effettivo del sistema. Questo passaggio ha consentito di selezionare i casi maggiormente rappresentativi sotto il profilo tecnico e progettuale, pur nella consapevolezza che alcuni esempi di grande interesse non hanno potuto essere approfonditi per carenza di informazioni adeguate. Tra questi si ricordano la Royal Academy of Music di Londra, il Terminal 1 dell'Aeroporto di Amburgo, la Business School progettata da Cesar Pelli Architects per la University of Illinois e il Grand Rapids Art Museum, caratterizzato da un articolato sistema di massa termica interrata. Sebbene non analizzati in modo sistematico, tali casi contribuiscono comunque a delineare l'ampiezza del panorama applicativo del TLVS a livello internazionale.

### Quarta fase - Sistematizzazione dei risultati

Ha previsto la selezione definitiva dei quattordici casi studio ritenuti più significativi e la successiva sistematizzazione comparativa dei risultati. La scelta degli edifici è avvenuta attraverso un processo valutativo che ha tenuto conto della centralità del TLVS all'interno della strategia bioclimatica complessiva, della chiarezza del suo ruolo nel sistema edificio-impianto, della disponibilità di dati quantitativi verificabili e della rappresentatività rispetto a differenti contesti climatici e tipologici. In questa fase il TLVS non è stato considerato come elemento accessorio, ma come dispositivo determinante nella regolazione microclimatica e nella riduzione dei carichi energetici estivi.



## 4.2 Elenco dei 100 casi di studio



1. 18 King Wah Road, Pelli Clarke & Partners, Hong Kong, Cina
2. Waitakere Hospital, Di Carlo Potts Architects, Auckland, Nuova Zelanda
3. Experimenta - Science Center, Sauerbruch Hutton, Heilbronn, Germania
4. The Great Hall, Kent College, Hazle McCormack Young LLP, Canterbury, Regno Unito
5. POSCO Green Building, POSCO A&C, Songdo (Incheon), Corea del Sud
6. Ewha Womans University Campus Complex (ECC), Dominique Perrault Architecture, Seoul, Corea del Sud
7. Norrsken Kigali House, MASS Design Group, Kigali, Ruanda
8. NREL Research Support Facility (RSF), RNL Design, Golden (CO), Stati Uniti
9. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Nikken Sekkei, Hayama, Giappone
10. Planet Earth Gallery (Earth Centre), Feilden Clegg Bradley Studios, Doncaster, Regno Unito
11. Nanaimo Regional General Hospital - Emergency Department, Stantec, Vancouver Island, Canada
12. TMB Headquarters (Turkish Contractors Association), AVCI Architects, Ankara, Turchia
13. Big Data Institute (BDI), Make Architects, Oxford, Regno Unito
14. Grid Storage Launchpad (PNNL), Kirksey, Richland (WA), Stati Uniti
15. Theodor-Heuss-Schule, Diehl Freischlad Schmees - Wagner, Wetzlar, Germania
16. Federation Square, Bates Smart + LAB Architecture Studio, Melbourne, Australia
17. Cockrell School of Engineering (EERC), Ennead Architects, Austin (TX), Stati Uniti
18. Sarah Kubitschek Hospital, João Filgueiras Lima (Lelé), Rio de Janeiro, Brasile
19. Blackmores Campus, WMK Architecture, Warriewood (Sydney), Australia
20. Biggin Hill Memorial Museum, Ritchie+Daffin (RDA), Biggin Hill (Londra), Regno Unito
21. ICA Boston (Institute of Contemporary Art), Diller Scofidio + Renfro, Boston (MA), Stati Uniti
22. The Burrell Collection (refurbishment), John McAslan + Partners, Glasgow, Regno Unito
23. Maths, Statistics & Computer Science Building (MSCS), Architectus + CHS Royal, Christchurch, Nuova Zelanda
24. UT Dallas Bioengineering & Sciences Building, Page + ZGF, Dallas (TX), Stati Uniti
25. Adobe Founders Tower / Adobe North Tower, Gensler, San José (CA), Stati Uniti
26. New York Botanical Garden - Campus Energy Upgrades, multiple teams (NYC DDC/DCAS), Bronx (NY), Stati Uniti
27. Park Terrace Gardens (retrofit multifamily - impianti), Bright Power (team retrofit), New York (NY), Stati Uniti
28. Unisphere (United Therapeutics HQ), EwingCole, Silver Spring (MD), Stati Uniti
29. Bundanon Art Museum & Bridge, Kerstin Thompson Architects, Shoalhaven (NSW), Australia
30. Glasgow Academy Science & Technology Building, PagePark Architects, Glasgow, Regno Unito
31. National Theatre (NT Future), Haworth Tompkins, Londra, Regno Unito
32. Kroon Hall (Yale), Hopkins Architects, New Haven (CT), Stati Uniti
33. Fashion Institute of Technology (campus energy retrofit), DCAS DEM + FIT (team retrofit), New York (NY), Stati Uniti
34. BSKyB HQ (campus), Arup Associates, Londra, Regno Unito
35. IIS Don Milani (retrofit), Carlo Lazzaroni + Daniele Bilios, Montichiari (BS), Italia
36. Seoul Energy Dream Center, Samoo Architects & Engineers (con PB/WSP), Seoul, Corea del Sud
37. Form Chriesbach (Eawag/Empa), Bob Gysin + Partner (campus), Dübendorf, Svizzera
38. Frick Environmental Center, Bohlin Cywinski Jackson, Pittsburgh (PA), Stati Uniti
39. 345 Hudson Street (Empire Building retrofit), multiple teams (Hines/Hudson Sq Properties), New York (NY), Stati Uniti
40. Südwestmetall Office Building, fritzen 28, Esslingen am Neckar, Germania
41. Bonfiglioli HQ, Peter Pichler Architecture, Calderara di Reno (BO), Italia
42. Kaiser Permanente Santa Rosa Medical Office Building, WRNS Studio, Santa Rosa (CA), Stati Uniti
43. Theodore Roosevelt Presidential Library, Snøhetta, Medora (ND), Stati Uniti
44. Asilo "Terra Madre" (Nil Kindergarten), Luca Peralta Studio, Bisceglie (BT), Italia
45. University of Arizona Bioscience Research Laboratories, ZGF Architects, Tucson (AZ), Stati Uniti
46. 1 New Street Square, Robin Partington Architects, Londra, Regno Unito
47. Novartis Institutes for Biomedical Research, Toshiko Mori Architect, Cambridge (MA), Stati Uniti
48. Sendai Mediatheque, Toyo Ito & Associates, Sendai, Giappone
49. Médiathèque du Sud Sauvage, Co-Architectes, Saint-Joseph, Réunion (Francia)
50. Alpine House (Royal Botanic Gardens Kew), WilkinsonEyre, Richmond (Londra), Regno Unito
51. Surry Hills Library & Community Centre, FJMT, Sydney, Australia
52. Eastgate Centre, Mick Pearce, Harare, Zimbabwe
53. Council House 2 (CH2), DesignInc + City of Melbourne (team), Melbourne, Australia
54. Commerzbank Tower, Foster + Partners, Francoforte, Germania
55. The Gherkin (30 St Marys Axe) - mixed-mode, Foster + Partners, Londra, Regno Unito
56. One Angel Square, 3DReid, Manchester, Regno Unito
57. The Bullitt Center, Miller Hull Partnership, Seattle (WA), Stati Uniti
58. The Edge, PLP Architecture, Amsterdam, Paesi Bassi
59. Parkroyal Collection Pickering, WOHA, Singapore
60. Kampung Admiralty, WOHA, Singapore
61. NUS School of Design & Environment 4 (SDE4), Serie Architects + Multiply Architects, Singapore
62. Manitoba Hydro Place, KPMB Architects, Winnipeg, Canada
63. Pearl Academy of Fashion, Morphogenesis, Jaipur, India
64. Suzanne Dellal Centre (retrofit passive strategies), Oren Sagiv (team), Tel Aviv, Israele
65. Menara Mesiniaga, Ken Yeang, Subang Jaya, Malesia
66. EDITT Tower (progetto bioclimatico), Ken Yeang, Singapore
67. Bahrain World Trade Center, Atkins, Manama, Bahrain
68. Mashrabiya House of Wisdom (biblioteca/centro culturale), Foster + Partners, Sharjah, Emirati Arabi Uniti
69. BedZED - ZED Factory (componenti terziarie del masterplan), Bill Dunster Architects, Londra, Regno Unito
70. Queens Building (DMU), Short & Associates, Leicester, Regno Unito
71. De Montfort University - Kimberlin Library extension (ventilazione naturale), Short & Associates, Leicester, Regno Unito
72. De Montfort University - Engineering Building (natural ventilation), Short & Associates, Leicester, Regno Unito
73. Harare International School (strategie passive), Mick Pearce (attrib.), Harare, Zimbabwe
74. Zimbabwe Eastgate-inspired offices (varie), Mick Pearce (attrib.), Harare, Zimbabwe
75. Zollverein School of Management & Design (ventilazione/massa), SANAA, Essen, Germania
76. RMIT Design Hub (strategie involucro/controllo solare), Sean Godsell Architects, Melbourne, Australia
77. Melbourne School of Design (MSD), John Wardle Architects + NADAAA, Melbourne, Australia
78. Pixel Building, Studio505, Melbourne, Australia
79. 7 More London Riverside (mixed-mode), Foster + Partners, Londra, Regno Unito
80. Bloomberg European HQ (natural ventilation + night purge in parti), Foster + Partners, Londra, Regno Unito
81. Media-TIC, Enric Ruiz-Geli (Cloud 9), Barcellona, Spagna
82. Torre Agbar (strategie involucro/ventilazione controllata), Jean Nouvel, Barcellona, Spagna
83. One Central Park (componenti non residenziali), Ateliers Jean Nouvel, Sydney, Australia
84. Barangaroo House, Collins and Turner, Sydney, Australia
85. CH2 Inspired Civic Offices, design teams locali, Australia
86. Jean-Marie Tjibaou Cultural Centre, Renzo Piano Building Workshop, Nouméa, Nuova Caledonia
87. California Academy of Sciences, Renzo Piano Building Workshop, San Francisco (CA), Stati Uniti
88. Macallen Building, Burt Hill (Perkins Eastman), Boston (MA), Stati Uniti
89. Portland Building "Eco-roof" offices (componenti retrofit), Michael Graves (orig.) + team retrofit, Portland (OR), Stati Uniti
90. Phipps Center for Sustainable Landscapes (CSL), The Design Alliance Architects, Pittsburgh (PA), Stati Uniti
91. Energy Academy Europe, Broekbakema + De Unie Architecten, Groningen, Paesi Bassi
92. Zion National Park Visitor Center, AECOM (ex-EDAW) + Design Workshop, Springdale (UT), Stati Uniti
93. Blue Ridge Parkway Destination Center, Glavé & Holmes Architecture, Asheville (NC), Stati Uniti
94. Solar XXI (edificio sperimentale), Maria da Graça Carvalho / IST (team), Lisbona, Portogallo
95. Nuvola Lavazza (HQ), Cino Zucchi Architetti, Torino, Italia
96. SIEEB (Sino-Italian Ecological and Energy Efficient Building), MCA Mario Cucinella Architects, Pechino, Cina
97. Vertikal Nydalen, Snøhetta, Oslo, Norvegia
98. Integral Territorial Center of the Commonwealth of Olivenza, Paredes Pedrosa Arquitectos, Olivenza, Spagna
99. POSCO Green building, Centro per la Ricerca sull'Architettura Eco-Sostenibile dell'Università di Yonsei, Incheon, New Songdo, Repubblica della Corea
100. Complesso multifunzionale ex Fiera di Rimini, Itali

## 4.3 Struttura delle schede e criteri di analisi

Le due schede di analisi dei casi studio sono state concepite come strumenti metodologici capaci di organizzare, comparare e interpretare in modo sistematico le informazioni relative ai progetti che adottano sistemi TLVS. La loro struttura è articolata in due livelli progressivi: una prima scheda (Scheda 1) dedicata al contesto generale e climatico, e una seconda (Scheda 2) focalizzata sugli aspetti tecnologici e prestazionali.

-La **prima scheda** è finalizzata alla restituzione degli aspetti introduttivi e contestuali del progetto analizzato e costituisce il livello preliminare di lettura del caso studio. Essa svolge una funzione di inquadramento generale, raccogliendo e sistematizzando le principali informazioni identificative, localizzative e ambientali che consentono di collocare il progetto all'interno di uno specifico contesto territoriale, climatico e progettuale. La scheda è concepita come uno strumento sintetico ma analitico, utile a fornire una base conoscitiva per le successive fasi di interpretazione e valutazione dei casi studio.

La fascia superiore della scheda è dedicata ai dati generali del progetto, che costituiscono il quadro introduttivo e identificativo dell'opera. In questa sezione sono riportate le principali informazioni utili alla catalogazione del caso studio, tra cui il progettista, l'anno di realizzazione, il luogo di intervento, la superficie complessiva, il costo di realizzazione e la destinazione d'uso dell'edificio. Tali dati permettono di collocare il progetto in una dimensione temporale, dimensionale e funzionale, offrendo un primo livello di comparazione tra i diversi casi analizzati.

Questo insieme di informazioni è integrato da una sezione dedicata alla localizzazione geografica, rappresentata attraverso una mappa che consente di individuare con immediatezza il contesto territoriale di riferimento. Alla rappresentazione cartografica si affiancano alcuni parametri climatici e insediativi di base, quali le coordinate geografiche del sito, l'altitudine, la densità insediativa e la classificazione climatica secondo il sistema Köppen-Geiger. L'inclusione di tali indicatori consente di definire con maggiore precisione il qua-

dro ambientale entro cui l'edificio è inserito.

Questi elementi risultano particolarmente rilevanti nell'ambito dello studio dei sistemi TLVS, poiché permettono di valutare preliminarmente il grado di compatibilità tra il contesto climatico-ambientale e le prestazioni attese dal sistema. La comprensione delle condizioni climatiche locali rappresenta infatti un presupposto fondamentale per analizzare l'efficacia delle strategie di ventilazione naturale e degli scambi termici con il terreno che caratterizzano tali dispositivi.

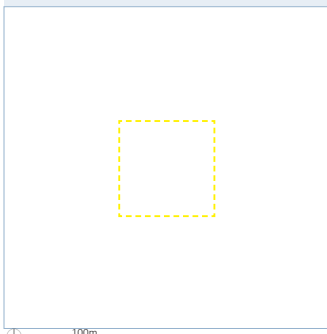
La parte centrale della scheda è dedicata all'analisi dei dati climatici, che rappresentano il nucleo della fase di contestualizzazione ambientale del caso studio. Diversamente da schemi di analisi climatica più generici, in questo caso si è scelto di includere non soltanto dati atmosferici superficiali, ma anche parametri microclimatici particolarmente significativi per lo studio dei sistemi TLVS.

In particolare, oltre alla rappresentazione dell'umidità del suolo e della temperatura del terreno a una profondità di circa 200 cm, parametro di grande rilevanza per i sistemi sotterranei che sfruttano l'inerzia termica del terreno, vengono riportati anche i valori medi mensili delle temperature massime dell'aria e della velocità del vento. La selezione di questi indicatori consente di delineare un quadro climatico funzionale alla comprensione delle condizioni operative del sistema. L'umidità e la temperatura del terreno influenzano infatti direttamente la capacità del labirinto termico di raffrescare o preriscaldare l'aria immessa negli ambienti interni, mentre le temperature atmosferiche e l'intensità dei venti incidono sulla domanda di ventilazione e sul potenziale scambio d'aria con l'esterno. In questo modo, i grafici climatici non si limitano a descrivere le condizioni meteorologiche del sito, ma assumono il ruolo di indicatori utili alla valutazione della compatibilità ambientale e delle prestazioni potenziali dei sistemi TLVS.

La parte inferiore della scheda è dedicata alla documentazione visiva del progetto, attraverso una selezione di immagini che illustrano sia l'aspetto esterno dell'edificio sia alcuni scorci degli spazi interni. La scheda si conclude con un riquadro finale che raccoglie eventuali certificazioni energetiche e ambientali associate al progetto, insieme alle principali fonti di riferimento, garantendo la tracciabilità e la validazione scientifica dei dati riportati.

**CODICE CS\_ NOME PROGETTO**

INFORMAZIONI GENERALI



**PROGETTISTA**



**ANNO**

**LUOGO**

**AREA**

**COSTO**

**DESTINAZIONE D'USO**

**coordinate**

**altitudine**

**densità**

**zona climatica**

COM

SCO

UNI

UFF

OSP

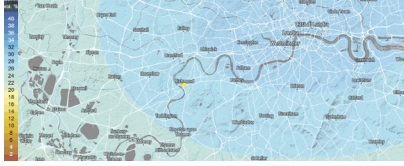
HUB

CULT

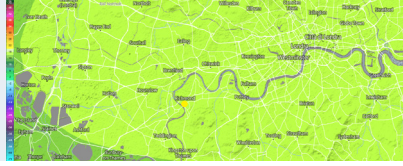
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

LOCALIZZAZIONE

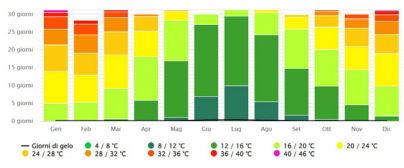
**Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)**



**Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)**



**Temperature massime**



**Velocità del vento**



IMMAGINI DI PROGETTO



DATI CLIMATICI

**CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:**

**FONTI:**

CERTIFICAZIONI

FONTI

**NUMERO SCHEDA , CODICE CASO STUDIO**

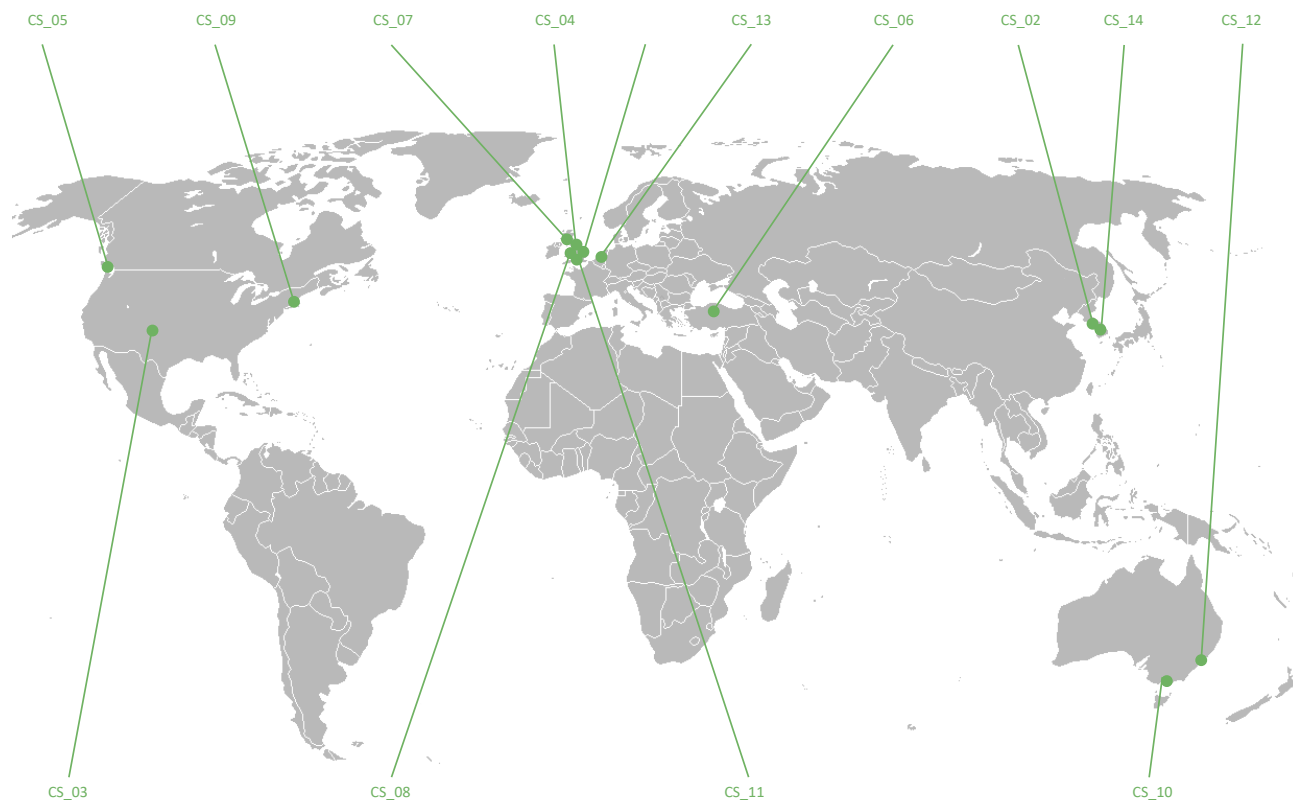
-La **seconda scheda** si concentra invece sugli aspetti tecnologici e prestazionali, fornendo un approfondimento mirato alle caratteristiche specifiche del progetto e del sistema. Una sezione introduttiva accoglie una descrizione del progetto e dei principali sistemi tecnologici utilizzati, utile a contestualizzare il caso studio in una prospettiva più ampia. Segue un riquadro tecnico interamente dedicato al sistema TLVS, che ne illustra i criteri di progettazione e applicazione. In primo luogo, viene indicata la tipologia di sistema tecnologico e le sue possibili collaborazioni funzionali con altre strategie bioclimatiche, quali il raffrescamento, l'atrio bioclimatico e le torri di ventilazione. Questa sezione evidenzia l'approccio integrato che caratterizza l'applicazione del TLVS, sottolineando come la sua efficacia derivi non solo dalle proprietà intrinseche del sistema, ma anche dalle sinergie instaurate con altre soluzioni passive. Segue la voce relativa alla collocazione del sistema in sinergia con gli altri. A completare questo quadro vi è l'indicazione dello sviluppo del sistema, che può essere orizzontale o verticale, e della tipologia geometrica interna delle pareti del labirinto (superfici lisce, ruvide, ondulate, quadrettate o a zig-zag).

Questa informazione è essenziale per la valutazione prestazionale, in quanto la geometria influenza in modo diretto la turbolenza interna, l'aumento della superficie di scambio e, quindi, l'efficacia nel modulare le condizioni termo-igrometriche dell'aria in ingresso e in uscita.

La sezione di valutazione sintetica consente di attribuire un giudizio comparativo a più dimensioni, attraverso un sistema di indicatori di performance introdotto ad hoc. Ciascun parametro è rappresentato graficamente tramite una scala di cinque livelli progressivi, resi visivamente con un numero crescente di pallini. La gradazione permette di esprimere un valore qualitativo che può essere successivamente tradotto in termini quantitativi, secondo le seguenti categorie: "Basso", "Medio-basso", "Medio", "Medio-alto" e "Alto". Questa modalità di rappresentazione consente di confrontare in maniera immediata e coerente sistemi diversi, garantendo al contempo una base valutativa oggettiva. L'organizzazione delle due schede, pensata in sequenza logica, consente dunque di leggere ogni caso studio in maniera stratificata: dalla cornice generale legata al sito e al clima, fino alla comprensione delle soluzioni tecnologiche e delle loro implicazioni prestazionali. Tale struttura metodologica, unendo dati oggettivi, rappresentazioni grafiche e valutazioni qualitative, garantisce una base solida per confrontare i diversi casi studio e per trarre considerazioni utili alla ricerca e all'applicazione del TLVS in contesti architettonici e climatici differenti.

| CODICE CS_ NOME PROGETTO                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| DESCRIZIONE PROGETTO                          | <div><div>Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:</div><div><div>TLVS</div><div>raffrescamento evaporativo</div><div>atrio bioclimatico</div><div>torre di ventilazione</div></div><div>Collocazione dei sistemi:</div><div><div>sotto terra</div><div>interno</div><div>facciata</div><div>copertura</div></div><div>Sviluppo del sistema TLVS:</div><div><div>orizzontale</div><div>verticale</div></div><div>Tipologia del sistema TLVS:</div><div><div>liscio</div><div>grezzo</div><div>ondulato</div><div>quadrettato</div><div>zig zag</div></div><div><div>Integrazione della tecnologia</div><div>Grado di durabilità</div><div>Prestazioni energetiche</div><div>Manutenzione</div><div>Risparmio fabbisogno energetico</div><div>Costo di messa in opera</div><div>Comfort indoor</div><div>Tempi di realizzazione</div></div></div> |  |
|                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
| DESCRIZIONE SISTEMA/I                         | <div><div></div><div></div><div></div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
| <div>NUMERO SCHEDA , CODICE CASO STUDIO</div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |

## 4.4 Elenco dei 14 casi di studio selezionati



1. The Great Hall, Kent College, Hazle McCormack Young LLP, Canterbury, Regno Unito
2. Ewha Womans University Campus Complex (ECC), Dominique Perrault Architecture, Seoul, Corea del Sud
3. NREL Research Support Facility (RSF), RNL Design, Golden (CO), Stati Uniti
4. Planet Earth Gallery (Earth Centre), Feilden Clegg Bradley Studios, Doncaster, Regno Unito
5. Nanaimo Regional General Hospital – Emergency Department, Stantec, Vancouver Island, Canada

6. TMB Headquarters (Turkish Contractors Association), AVCI Architects, Ankara, Turchia
7. Big Data Institute (BDI), Make Architects, Oxford, Regno Unito
8. Federation Square, Bates Smart + LAB Architecture Studio, Melbourne, Australia
9. Biggin Hill Memorial Museum, Ritchie+Daffin (RDA), Biggin Hill (Londra), Regno Unito
10. Unisphere (United Therapeutics HQ), EwingCole, Silver Spring (MD),

11. Stati Uniti  
Alpine House (Royal Botanic Gardens Kew), WilkinsonEyre, Richmond (Londra), Regno Unito
12. Surry Hills Library & Community Centre, FJMT, Sydney, Australia
13. Energy Academy Europe, Broekbakema + De Unie Architecten, Groningen, Paesi Bassi
14. POSCO Green building, Centro per la Ricerca sull'Architettura Eco-Sostenibile dell'Università di Yonsei, Incheon, New Songdo, Repubblica della Corea



CS\_01



CS\_06



CS\_11



CS\_02



CS\_07



CS\_12



CS\_03



CS\_08



CS\_13



CS\_04



CS\_09



CS\_14



CS\_05



CS\_10





*Figura 4.1* Vista esterna della Great Hall del Kent College di Canterbury. L'edificio presenta un involucro in laterizio caratterizzato da superfici compatte e da pannellature traforate che contribuiscono alla modulazione dell'illuminazione naturale e alla ventilazione dell'involucro. Fonte: HMY Architects, The Great Hall – Kent College Canterbury.

### Caso studio 1: The Great Hall, Kent College, Hazle McCormack Young LLP

Il Great Hall del Kent College, progettato da HMY Architects & Interiors (precedentemente Hazle McCormack Young LLP) e completato nel 2022, è un nuovo edificio realizzato nel campus del Kent College a Canterbury (Kent, Regno Unito). L'intervento nasce come ampliamento delle infrastrutture culturali e didattiche della scuola, con l'obiettivo di creare uno spazio multifunzionale dedicato ad attività artistiche, musicali e comunitarie. Il progetto si inserisce in un contesto climatico con inverni miti (temperature medie tra 4 e 7 °C) ed estati fresche (tra 18 e 22 °C), con precipitazioni distribuite durante tutto l'anno e umidità elevata (circa 75–80%). Queste condizioni rendono importante l'adozione di strategie passive di ventilazione e mitigazione termica, soprattutto per garantire buone prestazioni energetiche in un auditorium di grandi dimensioni e limitare i consumi estivi. Dal punto di vista funzionale, l'edificio ospita una sala per spettacoli e concerti da circa 350 posti, accompagnata da foyer, sale prova, spazi didattici e aree tecniche. La struttura è progettata per essere flessibile, permettendo concerti, rappresentazioni teatrali, assemblee scolastiche ed eventi pubblici, diventando così un polo culturale per il campus.

Architettonicamente, il volume è compatto e utilizza laterizio e legno come materiali di rivestimento, scelti per integrarsi con il linguaggio storico del campus. Gli interni sono progettati con grande attenzione all'acustica: la sala principale presenta soffitti in legno sagomato e superfici riflettenti che ottimizzano la diffusione del suono, migliorando la qualità dell'esperienza musicale e teatrale.

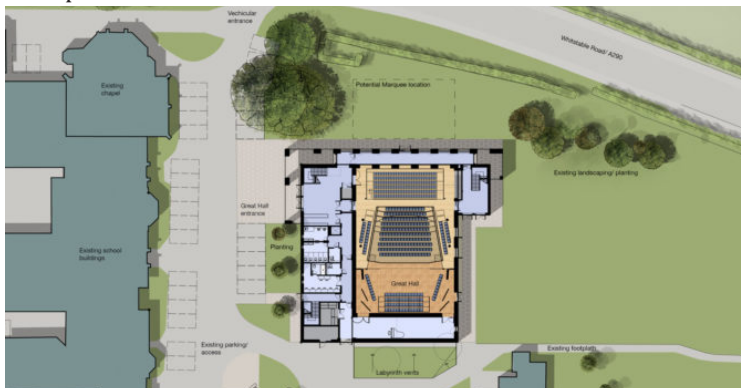
#### Sistema TLVS e configurazione tecnica

Il TLVS adottato è costituito da cinque camere ipogee in calcestruzzo, disposte parallelamente sotto l'edificio. Le camere sono larghe fino a 3,5 metri, profonde 2 metri, e progettate per sfruttare la massa termica delle pareti e del suolo circostante. Il sistema lavora secondo il principio del pretrattamento dell'aria, sfruttando la temperatura relativamente stabile del sottosuolo (circa 12 °C) per abbattere la temperatura dell'aria in ingresso durante l'estate e preriscaldarla nei mesi freddi. L'aria esterna viene convogliata attraverso le camere del labirinto, dove subisce uno scambio termico passivo con le superfici in calcestruzzo, prima di essere distribuita all'interno dell'auditorium. Il flusso d'aria è regolato attraverso sistemi di

ventilazione naturale controllata, senza l'ausilio di compressori o refrigeratori. Secondo quanto riportato dalla rivista CIBSE Journal (2018), il sistema ha permesso l'eliminazione completa dei sistemi di climatizzazione meccanica. Questo ha determinato una riduzione significativa del consumo energetico associato al raffrescamento, abbattendo sia i costi operativi sia le emissioni di CO<sub>2</sub>. Il tempo di ritorno dell'investimento (payback) del sistema è stimato tra i 10 e i 15 anni, in linea con altri edifici scolastici ad alte prestazioni nel Regno Unito. Il TLVS è stato integrato fin dalle prime fasi progettuali, sia come soluzione tecnica sia come componente architettonica. Il labirinto non solo contribuisce al controllo termico, ma funge anche da elemento strutturale secondario e da cassa di risonanza acustica per l'auditorium. L'integrazione con altre soluzioni passive, come lucernari orientati, protezioni solari e isolamento ad alte prestazioni, fa del Great Hall un esempio pionieristico di architettura scolastica a basso impatto ambientale.

#### Rilevanza per la ricerca

La rilevanza di questo caso studio per la presente ricerca risiede nella sua capacità di dimostrare in maniera concreta la fattibilità tecnica e l'efficacia del TLVS applicato a edifici di grandi dimensioni, evidenziandone le potenzialità anche in contesti complessi come un auditorium multifunzionale. La collocazione geografica a Canterbury, caratterizzata da un clima temperato con condizioni assimilabili a quelle riscontrabili in molte aree mediterranee durante le mezze stagioni, rende l'esperienza particolarmente significativa in termini di trasferibilità dei risultati. Inoltre, il progetto fornisce dati misurabili riguardanti il risparmio energetico, il comfort interno e la replicabilità tecnologica, offrendo un quadro solido per la valutazione delle prestazioni del sistema.

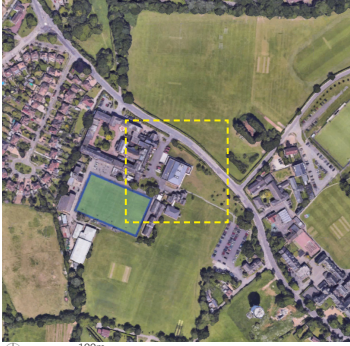


*Figura 4.2 Planimetria della Great Hall del Kent College di Canterbury e del suo inserimento nel campus scolastico. Il disegno evidenzia la configurazione interna della sala principale, gli spazi di servizio e le relazioni con gli edifici esistenti e con le aree esterne del complesso. Fonte: HMY Architects, The Great Hall – Kent College Canterbury.*



CS\_01 The Great Hall, Kent College

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
Hazle McCormack Young LLP  
**ANNO**  
2018/19  
**LUOGO**  
Canterbury, Regno Unito  
**AREA**  
- mq  
**COSTO**  
£6,1 milioni  
**DESTINAZIONE D'USO**  
Edificio musicale e teatrale con servizi religiosi



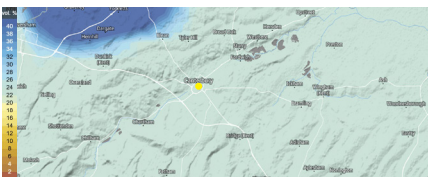
LOCALIZZAZIONE



**coordinate** 51°16'N 1°05'E  
**altitudine** 3 m s.l.m.  
**densità** 758,79 ab./km²  
**zona climatica** Cfb\* (climi caldi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

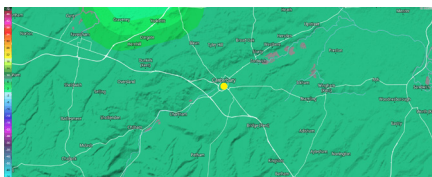
DATI CLIMATICI

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



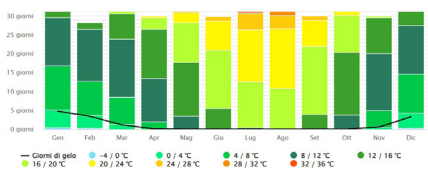
Nella città di Canterbury, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 22% e il 24%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



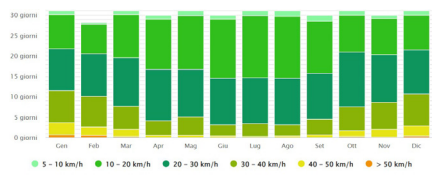
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Canterbury sono tra gli 8 e i 10 °C

Temperature massime



Con una temperatura media di 17.6 °C, Luglio è il mese più caldo dell'anno. Durante il mese di Febbraio, si registra una media delle minime di circa 5.2 °C.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 5,4 mesi, con velocità medie di oltre 23,0 km/h. Il giorno più ventoso dell'anno è gennaio, con una velocità oraria media del vento di 27,5 Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista frontale dell'edificio



Fig.2 Vista frontale della facciata dell'edificio

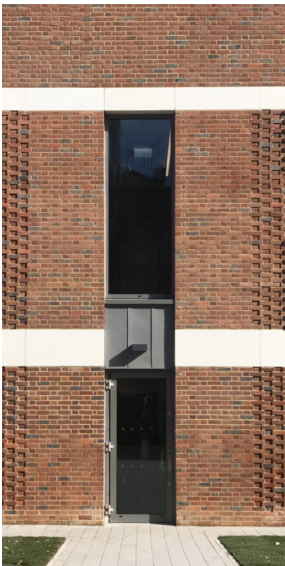


Fig.3 Dettaglio della facciata esterna



Fig.4 Interno della sala teatrale

CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:

-

FONTI:

<https://www.cibsejournal.com/case-studies/chamber-music/>  
<https://www.hmy.uk.com/projects/the-great-hall-kent-college-canterbury/>  
<https://www.kentdesign.org/developments/the-great-hall-kent-college-canterbury/>  
<https://www.rcinews.it/2022/10/24/la-nuova-great-hall-del-kent-college-di-canterbury/>

## CS\_01 The Great Hall, Kent College

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

La nuova Great Hall del Kent College di Canterbury è stata progettata con lo scopo di fornire uno spazio per spettacoli musicali e teatrali di livello professionale e, al tempo stesso, una struttura per eventi e assemblee. La sala, alta 11 metri, può ospitare fino a 600 persone sedute in platea e nelle gallerie. All'esterno le pareti in mattoni e il tetto a falde di colore grigio conferiscono all'edificio un aspetto sobrio. Il tema continua all'interno, con un impatto estetico relativamente forte ma allo stesso tempo raffinato ottenuto con le finiture dello spazio dedicato alle performance realizzate in mattoni a vista e legno. La sala è orientata su un asse nord-sud, con il palcoscenico posto a sud (figura 3). Poiché si tratta di uno spazio polivalente, l'involucro prevede una superficie vetrata significativa, sebbene essa sia concentrata principalmente sui prospetti nord ed est, dove i carichi solari sono meno problematici.

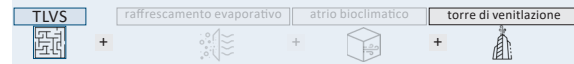
### SISTEMI TECNOLOGICI

La caratteristica principale dal punto di vista impiantistico è rappresentata dall'utilizzo di un sistema di ventilazione naturale combinato con condotte geotermiche per il preraffreddamento di grandi quantità di aria esterna senza la necessità di utilizzare sistemi di raffreddamento di tipo meccanico. Le condotte geotermiche sono fondamentali per garantire le prestazioni del sistema di ventilazione naturale e mantenere condizioni di comfort nella sala durante la stagione estiva. L'aria esterna entra nell'edificio da lato sud e attraversa cinque gigantesche camere sotterranee in cemento, ciascuna delle quali misura fino a 3,5 metri di larghezza e 2 metri di altezza. L'area della sezione trasversale di passaggio è stata progettata abbastanza grande da permettere all'aria di transitare praticamente senza ostacoli. Con un sistema di ventilazione naturale, in genere si dispone infatti soltanto di una pressione massima di circa 0,5 Pa. In estate, la temperatura relativamente costante del terreno, intorno a 12 °C, garantisce il mantenimento delle pareti delle camere a una temperatura prossima a questo valore, il che consente il preraffreddamento dell'aria esterna che entra nell'edificio. La divisione dell'aspirazione in cinque condotte separate permette di aumentare l'area delle pareti a contatto con l'aria, e quindi di massimizzare il trasferimento di calore, e di ripartire l'aria di mandata in funzione delle zone servite.

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO

### DATI

#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

#### Integrazione della tecnologia



#### Grado di durabilità



#### Prestazioni energetiche



#### Manutenzione



#### Risparmio fabbisogno energetico



#### Costo di messa in opera



#### Comfort indoor



#### Tempi di realizzazione

medio

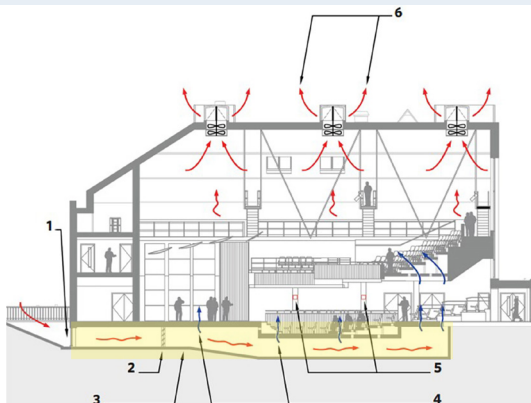


Fig.1 Funzionamento del sistema in regime estivo con attivazione della condotta geotermica. 1 – Ingresso dell'aria nella condotta geotermica 2 – Serrande motorizzate a modulazione 3 – Percorso nella condotta geotermica 4 – Immissione dell'aria tramite griglie a pavimento e parete 5 – Sonde di rilevamento a parete per temperatura e CO<sub>2</sub> 6 – Espulsione dell'aria attraverso serrande modulanti delle unità ventilanti (ventilatori passivi).

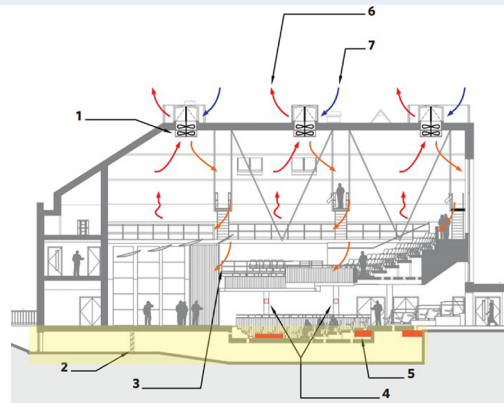


Fig.2 Funzionamento del sistema in regime invernale senza condotta geotermica 1 – Ventilatori per miscela aria esterna con aria calda sotto la copertura, con immissione per gravità 2 – Serrande motorizzate chiuse 3 – L'aria fredda cade per gravità e si miscela con l'aria ambiente prima che essa arrivi nella zona occupata 4 – Sonde a parete di temperatura e CO<sub>2</sub> 5 – Riscaldamento con convettori statici nascosti nella condotta geotermica 6 – Espulsione dell'aria ambiente calda attraverso l'unità ventilante 7 – Ingresso aria esterna fredda attraverso l'unità ventilante



Fig.3 La condotta geotermica ripresa con i convettori statici visibili in primo piano, le serrande modulanti collocate sullo sfondo e, lateralmente, le griglie a parete, mentre a soffitto sono presenti le griglie di mandata a pavimento.



Fig.4 Una delle cinque condotte geotermiche di maggiori dimensioni, realizzata in calcestruzzo.

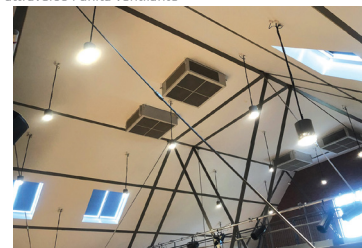


Fig.5 Le unità di ventilazione integrate a soffitto, progettate per favorire la circolazione dell'aria e contribuire al mantenimento delle condizioni termoigrometriche ottimali.



*Figura 4.3* Vista dello spazio aperto centrale dell'Ewha Womans University Campus Complex (ECC) a Seul, progettato da Dominique Perrault. Il progetto si sviluppa come una grande valle artificiale scavata nel terreno, configurando uno spazio pubblico pedonale che collega i diversi livelli del campus e integra gli edifici nel paesaggio. Fonte: Dominique Perrault Architecture, Ewha Womans University Campus Complex, Seoul.



*Figura 4.4* Vista interna di uno degli spazi di distribuzione dell'Ewha Womans University Campus Complex, caratterizzato da facciate vetrate continue che favoriscono la permeabilità visiva tra interno ed esterno e l'ingresso della luce naturale negli ambienti ipogei. Fonte: Dominique Perrault Architecture, Ewha Womans University Campus Complex, Seoul.

## Caso studio 2: Ewha Womans University Campus Complex, Dominique Perrault, Seoul, Corea del Sud

Il Ewha Womans University Campus Complex (ECC), situato a Seoul in Corea del Sud e progettato dallo studio Dominique Perrault Architecture, è un rilevante esempio internazionale di architettura integrata con strategie bioclimatiche. Completato nel 2008, il complesso si estende su una superficie edificata di circa 65.000–70.000 m<sup>2</sup> all'interno di un sito di circa 19.000 m<sup>2</sup> nel distretto di Seodaemun-gu, nel campus della Ewha Womans University. Il progetto è stato sviluppato per ampliare le funzioni universitarie senza alterare il paesaggio storico del campus. Per questo motivo gran parte dell'edificio è collocata sotto il livello del terreno, mentre la copertura è progettata come una valle artificiale verde ("campus valley") che attraversa il sito e collega i due versanti del campus. L'edificio è quindi modellato sulla topografia digradante del terreno e si inserisce in un contesto urbano denso e complesso. Il complesso ospita numerosi servizi universitari — biblioteche, aule, spazi di studio, auditorium, negozi, spazi espositivi e strutture sportive — diventando un nuovo centro di aggregazione per la comunità accademica. Dal punto di vista architettonico, due grandi pareti inclinate rivestite in vetro e acciaio delimitano la valle centrale e permettono alla luce naturale di penetrare negli ambienti sotterranei, creando spazi luminosi nonostante la loro posizione. Il progetto risponde anche alle condizioni climatiche locali, caratterizzate da clima subtropicale umido, con estati calde e umide (circa 25–30 °C), inverni freddi ed elevata variabilità stagionale e umidità relativa. L'inserimento dell'edificio nel terreno e la copertura verde migliorano l'inerzia termica, riducono l'irraggiamento solare estivo e contribuiscono al comfort interno. Insieme all'uso di illuminazione naturale, materiali locali e sistemi di drenaggio sostenibile, l'ECC rappresenta un esempio significativo di architettura resiliente e sostenibile applicata a un grande complesso universitario.

### Sistema TLVS e configurazione tecnica

Nel caso dell'ECC, il progetto architettonico e impiantistico incorpora vari sistemi bioclimatici volti al risparmio energetico, tra cui envelope ad alta efficienza, coperture verdi, utilizzo delle acque piovane e della falda come risorsa ed è stato implementato un TLVS verticale, che sfrutta un'intercapedine strutturale laterale disposta lungo i sei piani dell'edificio. Il sistema è costituito da una cavità di circa 1,4 metri tra il muro di contenimento e la parete interna in



calcestruzzo armato, estesa su una superficie complessiva di circa 140 m<sup>2</sup>. Questo spazio, già previsto nella progettazione strutturale, è stato adattato per ospitare il labirinto termico senza la necessità di nuovi volumi tecnici. L'aria esterna entra dal livello superiore e attraversa il labirinto sotterraneo, dove subisce uno scambio termico passivo con le superfici murarie, mantenute a una temperatura relativamente stabile grazie alla massa termica del terreno. L'aria viene quindi raffreddata in estate fino a 7 °C e preriscaldata in inverno fino a 10 °C prima di essere convogliata negli spazi interni tramite un sistema a pressione controllata. Secondo i dati forniti dagli studi pubblicati (Song et al., 2014), il sistema TLVS dell'ECC ha contribuito a una riduzione del 31,3% del fabbisogno energetico per la climatizzazione rispetto ad edifici convenzionali. Inoltre, l'edificio mostra una riduzione del 13,5% delle emissioni di gas serra per metro quadrato. Il tempo di ammortamento energetico è stato stimato in circa 12,1 anni, rendendo la soluzione vantaggiosa anche in termini economici e di ciclo di vita. Il sistema ha migliorato sensibilmente il comfort interno, specialmente negli spazi ipogei e nei livelli inferiori, riducendo il ricorso alla ventilazione meccanica tradizionale.

#### Rilevanza per la ricerca

Se il caso del Great Hall del Kent College ha evidenziato la fattibilità tecnica del TLVS in edifici di grandi dimensioni situati in climi temperati, il progetto dell'Ewha Womans University Campus Complex amplia ulteriormente la prospettiva, dimostrando come soluzioni affini possano essere efficacemente integrate in contesti caratterizzati da climi caldo-umidi e in strutture accademiche di scala molto maggiore. La rilevanza risiede soprattutto nella sua dimostrazione di come soluzioni affini al TLVS possano essere adattate a climi caldo-umidi, mantenendo prestazioni elevate in condizioni ambientali più estreme rispetto ai contesti temperati. L'intervento evidenzia inoltre l'opportunità di integrare i sistemi di ventilazione e massa termica in strutture su larga scala e con programmi funzionali complessi, mostrando la flessibilità del concetto di labirinto termico anche al di fuori degli schemi più tradizionali. Di particolare interesse è anche il ruolo che il progetto assegna all'interazione tra architettura e spazio urbano, in cui la configurazione della "campus valley" contribuisce al controllo microclimatico e alla diffusione naturale dell'aria, offrendo spunti utili per futuri sviluppi del TLVS in contesti densi e pedonalizzati.



*Figura 4.5 Dettaglio della facciata dell'Ewha Womans University Campus Complex. Fonte: Dominique Perreault Architecture, Ewha Womans University Campus Complex, Seoul.*

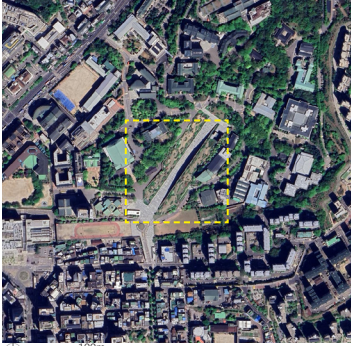


*Figura 4.6 Vista del condotto orizzontale di uno scambiatore aria-terra (EAHX/TLVS): estremità del condotto, evidenziando la configurazione costruttiva e la chiusura terminale del sistema.*

*Fonte: Song, S. Y., Lim, J. H., & Kim, S. H. (2014). Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system in reducing building energy demand. International Journal of Sustainable Built Environment, 3(2), 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.11.001>*

CS\_02 Ewha Women's University Campus Complex

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
Dominique Perrault  
**ANNO**  
2004-2008  
**LUOGO**  
Seoul, Corea del Sud  
**AREA**  
70.000 mq  
**COSTO**  
Confidenziale  
**DESTINAZIONE D'USO**  
Istruzione e ricerca, Università e campus



LOCALIZZAZIONE

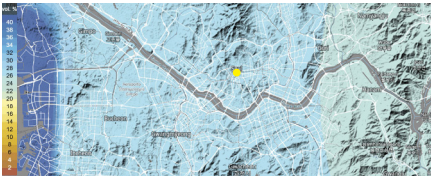


**coordinate** 37°33'N 126°59'E  
**altitudine** 38 m s.l.m.  
**densità** 15 604,04 ab./km²  
**zona climatica** Dwa\* (climi freddi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

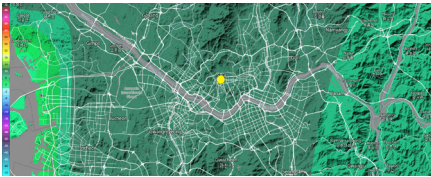
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



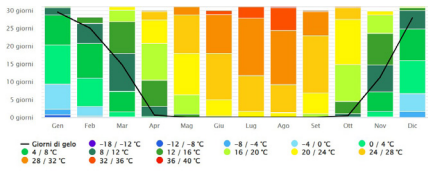
Nella città di Seoul, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 26% e il 28%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Seoul sono tra i 14 e i 16°C

Temperature massime



La stagione calda dura 4,0 mesi, con una T. giornaliera max oltre 24 °C. Il mese più caldo dell'anno è agosto, con una T.media massima di 29 °C e minima di 23 °C.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 6,7 mesi, con velocità medie del vento di oltre 13,0 km/h. Il mese più ventoso è febbraio, con una velocità oraria media del vento di 15,0 Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista frontale dell'edificio

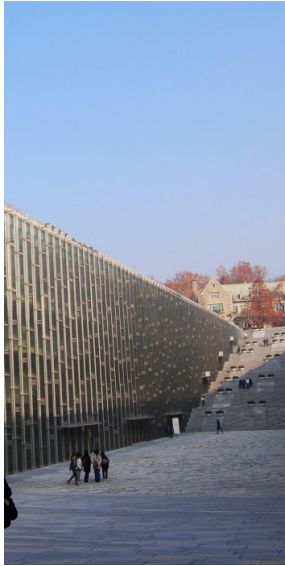


Fig.2 Vista frontale della facciata dell'edificio



Fig.3 Dettaglio della facciata interna



Fig.4 Interno dell'edificio

CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:

2010: AFEX Prize  
2009: Green Good Design Environment / Landscape Architecture Award  
2008: Seoul Metropolitan Architecture Award, First Prize

FONTI:

<https://www.donga.com/news/Culture/article/all/20080703/8597671/1>  
<https://archidiap.com/opera/ewha-womans-university/>  
<https://www.archdaily.com/227874/ewha-womans-university-dominique-perrault-architecture>  
[https://www.perraultarchitecture.com/en/projects/2459-ewha\\_womans\\_university.html](https://www.perraultarchitecture.com/en/projects/2459-ewha_womans_university.html)



## CS\_02 Ewha Women's University Campus Complex

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Fin da quando è stato inaugurato, il 29 Aprile del 2008, il Campus dell'Università Femminile Ewha a Seoul, Corea del Sud, ha suscitato subito una vasta eco per l'approccio innovativo che Dominique Perrault ha proposto. Si tratta di una vera e propria integrazione tra architettura "costruita" e architettura del paesaggio, che cita altri interventi precedenti dell'architetto francese in cui egli manifesta il proprio interesse per un'architettura "scavata", quasi ipogea e integrata col territorio (si pensi ad esempio al Velodromo e alla Piscina Olimpica di Berlino). L'intenzione era evidentemente quella di creare un edificio innovativo e di ampie dimensioni rispettando comunque il luogo dove si stava andando a costruire: l'Università Femminile Ewha è una delle più prestigiose università del mondo ed è composta da una cittadella con edifici rivestiti in pietra che hanno oltre un secolo di storia; i palazzi del complesso hanno forme propriamente "occidentali", che ricordano più un college americano che un'università dell'estremo oriente. Il tutto all'interno di un parco di notevoli dimensioni che costituisce una sorta di "oasi" in mezzo al caos di una megalopoli di oltre tredici milioni di abitanti quale è appunto Seoul.

### SISTEMI TECNOLOGICI

Scavata nel terreno per creare una gigantesca valle lunga 250 metri 6 piani di altezza con sale conferenze su entrambi i lati "Le pareti di vetro sono una cascata di luce", progettate da Buddha Pero. Labirinti termici e acqua sotterranea per il riscaldamento e il raffreddamento ecologici. Il progetto dei sistemi di ventilazione, riscaldamento e raffreddamento dell'ECC per l'imponente struttura sotterranea riflette la preoccupazione per la sostenibilità, un tema caldo nell'architettura mondiale. La soluzione è un "labirinto termico" largo 1 metro creato tra il terreno scavato e le pareti esterne dell'edificio. L'idea è che lo spazio sotterraneo sia più fresco in estate e più caldo in inverno rispetto alla superficie. L'aria esterna che passa attraverso il labirinto termico viene raffreddata di 7 °C in estate e riscaldata di 10 °C in inverno prima di essere aspirata dal sesto piano sottostante.

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO

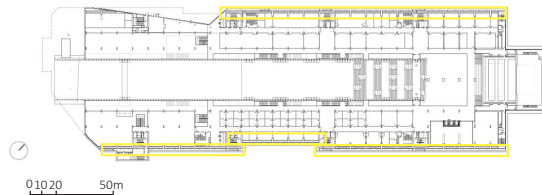


Fig.5 Planta del piano terra dell'edificio con l'evidenziazione del TLVS in giallo



Fig.6 Due sezioni trasversali dell'edificio con l'evidenziazione del TLVS in giallo



Fig.7 Sezione longitudinale dell'edificio

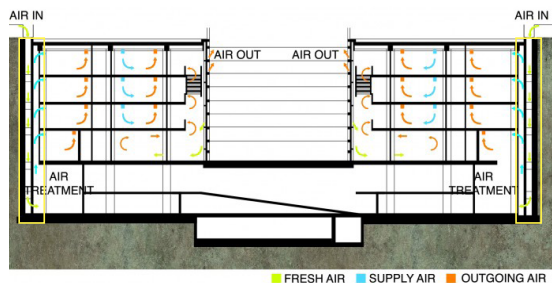
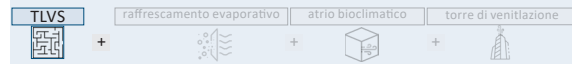


Fig.7 Schematizzazione grafica del funzionamento del sistema TLVS (evidenziato in giallo)

### DATI

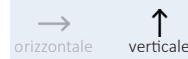
#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

#### Integrazione della tecnologia



#### Grado di durabilità



#### Prestazioni energetiche



#### Manutenzione



#### Risparmio fabbisogno energetico



#### Costo di messa in opera



#### Comfort indoor



#### Tempi di realizzazione

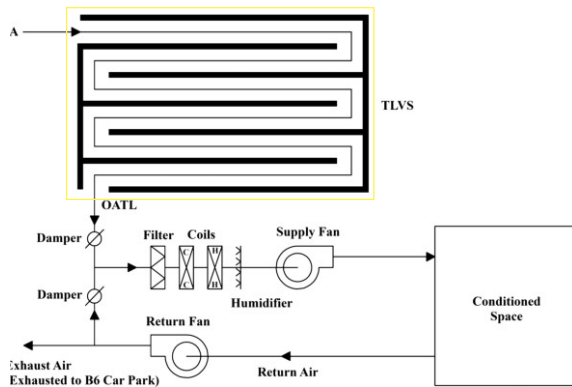


Fig.6 Schematizzazione del funzionamento del sistema di ventilazione partendo dall'ingresso dell'aria esterna nel TLVS evidenziato in giallo

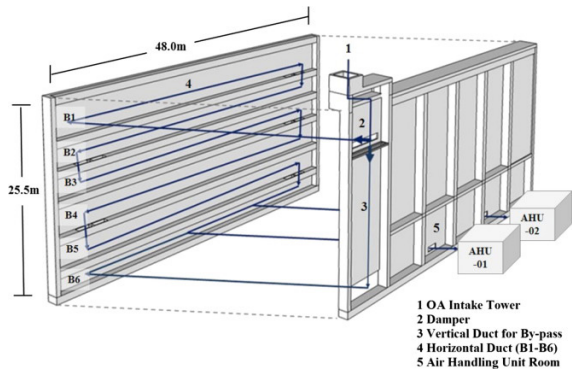
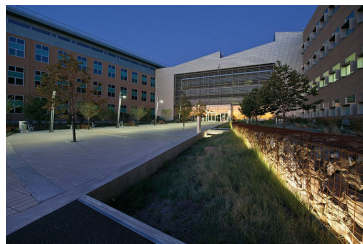


Fig.6 Esploso assometrico delle condotte del TLVS verticale



*Figura 4.7 Vista dello spazio aperto e della corte interna del complesso Research Support Facility (RSF), concepito come elemento di connessione tra i diversi volumi edilizi e come area di socializzazione per gli utenti del campus. L'organizzazione degli spazi esterni contribuisce alla qualità ambientale complessiva del complesso. Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL), Research Support Facility, Golden, Colorado.*

### Caso studio 3: National Renewable Energy Laboratory (NREL), RNL Design, Golden, CO, Stati Uniti

Il Research Support Facility (RSF) del National Renewable Energy Laboratory (NREL) è un edificio per uffici e ricerca situato nel campus del laboratorio a Golden, Colorado (USA). Il progetto è stato completato nel 2010–2012 e progettato dallo studio RNL Design (oggi Stantec) con l'obiettivo di dimostrare la fattibilità di un edificio per uffici di grandi dimensioni a energia netta zero (Net Zero Energy Building). L'edificio ha una superficie di circa 220.000 ft<sup>2</sup> (≈20.400 m<sup>2</sup>) e ospita oltre 800 ricercatori e dipendenti del laboratorio. Il complesso è costituito da due ali parallele di uffici organizzate attorno a cortili interni che permettono una distribuzione ottimale della luce naturale e della ventilazione. L'energia necessaria al funzionamento dell'edificio viene compensata tramite un impianto fotovoltaico di circa 2.5 MW installato sulla copertura e sulle pensiline dei parcheggi del campus, consentendo di raggiungere un bilancio energetico annuale pari a zero. Dal punto di vista ambientale l'edificio ha ottenuto la certificazione LEED Platinum ed è considerato uno dei primi esempi di net-zero energy office building su larga scala negli Stati Uniti.

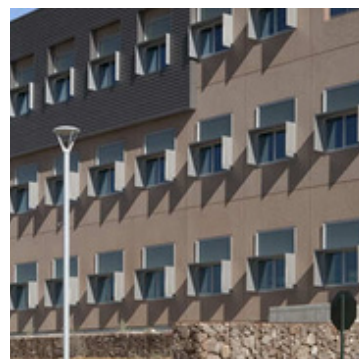
#### Sistema TLVS e configurazione tecnica

Uno degli elementi distintivi del RSF è collocato al di sotto delle due ali principali dell'edificio, in uno spazio tipo crawl space che sfrutta la massa termica del suolo e delle strutture in calcestruzzo per accumulare calore o freddo. Occupa una superficie di circa 560 m<sup>2</sup>, con condotti di altezza variabile tra 2,5 e 3 metri, larghezze comprese tra 2 e 4 metri e un percorso dell'aria lungo tra 25 e 30 metri. La geometria modulare e suddivisa in corridoi paralleli consente un controllo flessibile del flusso d'aria, in funzione del fabbisogno termico stagionale e delle condizioni ambientali esterne. L'aria esterna, in inverno, viene preriscaldata grazie ai transpired solar collectors posti sulla facciata sud, che convogliano il flusso nel labirinto per caricare termicamente la massa, consentendo così un rilascio graduale del calore nelle stagioni fredde. Durante l'estate, invece, il sistema agisce come pozzo termico (thermal sink), ricaricandosi nelle ore notturne quando l'aria esterna è più fresca e contribuendo a ridurre i carichi termici diurni, con un preriscaldamento/raffrescamento dell'aria di ventilazione pari a circa 5–10 °F (≈ 2,8–5,5 °C). L'impianto è strettamente integrato con altre soluzioni tecnologiche: un sistema radiante (TABS) che impiega circa 42 migliaia di

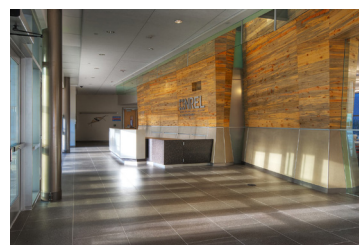
tubazioni distribuite nei plafoni e copre oltre il 75% delle superfici condizionate, un sistema di ventilazione DOAS con distribuzione dell'aria tramite pavimento sopraelevato e l'opzione di ventilazione naturale notturna (night purging) tramite finestre apribili. La massa termica è ulteriormente potenziata dall'involucro, costituito da pannelli prefabbricati in calcestruzzo isolato con un'anima di circa 15 cm di calcestruzzo esposto e strati isolanti esterni, in grado di moderare le escursioni termiche. Il sistema contribuisce in modo sostanziale alla strategia di Net Zero Energy, permettendo un notevole abbattimento dei carichi di raffrescamento e riscaldamento e quindi dei consumi energetici complessivi dell'edificio. Il sistema ha eliminato quasi del tutto la necessità di climatizzazione meccanica durante le mezze stagioni e ridotto sensibilmente la dipendenza da sistemi HVAC convenzionali nei periodi di picco. Il costo di costruzione complessivo dell'edificio è stato di circa 57,4 milioni di dollari, equivalente a 259 \$/ft<sup>2</sup>, perfettamente in linea con edifici simili non a energia zero, dimostrando che l'integrazione di tecnologie passive non comporta necessariamente un incremento dei costi iniziali. Il RSF è stato ampiamente documentato come uno degli edifici ad alte prestazioni più efficienti degli Stati Uniti, con certificazione LEED Platinum e ampio riconoscimento da parte della comunità scientifica e istituzionale.

Rilevanza per la ricerca

Nel NREL Research Support Facility il Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) è utilizzato come sistema di pre-condizionamento passivo dell'aria di ventilazione. L'aria esterna attraversa condotti sotterranei in calcestruzzo ad alta massa termica, dove scambia calore con il terreno, permettendo pre-raffrescamento in estate e pre-riscaldamento in inverno prima di entrare nel sistema HVAC. Il TLVS è integrato con ventilazione con recupero di calore e sistemi radianti a bassa temperatura, contribuendo alla riduzione dei carichi energetici per climatizzazione. Questa strategia fa parte dell'approccio integrato che ha permesso all'edificio di raggiungere un Energy Use Intensity di circa 35 kBtu/ft<sup>2</sup>·anno ( $\approx 110$  kWh/m<sup>2</sup>·anno), circa 50–60% inferiore rispetto agli edifici per uffici convenzionali, supportando l'obiettivo di Net Zero Energy. Il progetto rappresenta quindi un caso studio rilevante perché dimostra l'efficacia del TLVS in edifici per uffici di grande scala, evidenziando il potenziale del pre-condizionamento dell'aria tramite massa termica del terreno per ridurre i consumi energetici e migliorare l'efficienza dei sistemi HVAC.



*Figura 4.8* Vista esterna del Research Support Facility (RSF) del National Renewable Energy Laboratory (NREL) a Golden, Colorado. L'edificio, progettato secondo principi di alta efficienza energetica, integra strategie passive di controllo climatico e soluzioni architettoniche volte alla riduzione dei consumi energetici e all'ottimizzazione delle prestazioni ambientali. Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL), Research Support Facility, Golden, Colorado.



*Figura 4.9* Vista interna dell'atrio e dell'area di accoglienza del Research Support Facility (RSF) del National Renewable Energy Laboratory. Gli spazi interni valorizzano materiali naturali e illuminazione naturale, coerentemente con l'approccio sostenibile adottato nel progetto. Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL), Research Support Facility, Golden, Colorado.



CS\_03 National Renewable Energy Laboratory

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
RNL Design  
**ANNO**  
2006-2011  
**LUOGO**  
Golden, CO, United States  
**AREA**  
31.587 mq  
**COSTO**  
135 milioni di dollari

**DESTINAZIONE D'USO**  
Laboratorio nazionale per le energie rinnovabili  
Struttura di supporto alla ricerca, Uffici  
**COM** **SCO** **UNI** **UFF** **OSP** **HUB** **CULT**

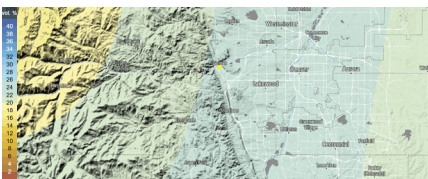
LOCALIZZAZIONE



**coordinate** 39°44'49"N 105°12'39"W  
**altitudine** 1.730 m s.l.m.  
**densità** 736,44 ab./km²  
**zona climatica** Dfb\* (climi freddi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

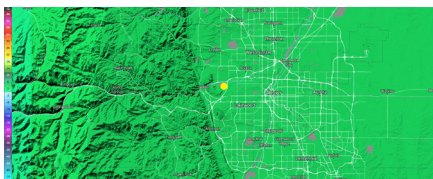
DATI CLIMATICI

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



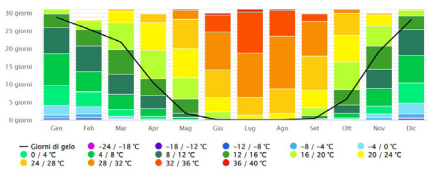
Nella città di Canterbury, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 22% e il 24%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



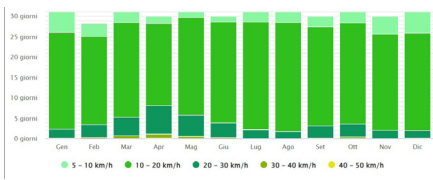
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Canterbury, sono tra i 14 e i 16°C

Temperature massime



La stagione calda dura 3,2 mesi, con una T giornaliera max oltre 24 °C. Il mese più caldo dell'anno è luglio, con una T media massima di 29 °C e minima di 15 °C.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 5,4 mesi, con velocità medie del vento di oltre 12,6 km/h. Il giorno più ventoso dell'anno è gennaio, con una velocità oraria media del vento di 15,3 km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista frontale dell'edificio



Fig.2 Vista frontale della facciata dell'edificio



Fig.3 Dettaglio della facciata esterna



Fig.4 Interno dell'edificio

CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:  
-LEED Certified Platinum  
-primo Zero Energy Building (ZEB)

SOURCE:  
<https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/51742.pdf>  
[https://www.arch2o.com/the-research-support-facility-nrl-design/#google\\_vignette](https://www.arch2o.com/the-research-support-facility-nrl-design/#google_vignette)  
[https://newbuildings.org/wp-content/uploads/2017/09/Radiant\\_NREL\\_FINAL.pdf](https://newbuildings.org/wp-content/uploads/2017/09/Radiant_NREL_FINAL.pdf)  
<https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51387.pdf>

### CS\_03 National Renewable Energy Laboratory

#### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Il National Renewable Energy Laboratory (NREL) del Dipartimento dell'Energia mette in pratica la propria missione costruendo edifici e infrastrutture ad alte prestazioni che mettono in mostra tecnologie di energia pulita, materiali rinnovabili e riciclati, risparmio idrico, tutela ambientale e riduzione dei rifiuti.

#### SISTEMI TECNOLOGICI

Sistemi tecnologici nel progetto:

- raffreddamento evaporativo a pavimento, soffitti radianti, ventilazione naturale e ventilazione notturna;
- le finestre apribili consentono il raffreddamento e la ventilazione naturali in tutto l'edificio;
- il calore di scarto del data center viene catturato e riutilizzato per riscaldare la struttura durante i mesi invernali e viene anche esportato in altre parti del campus, contenendo l'aria e scaricandola nel labirinto per utilizzarla per preriscaldare l'edificio;
- collettore solare traspirante sulla facciata sud per produrre aria calda e rilasciarla nel labirinto per preriscaldare l'edificio;
- impianto fotovoltaico sul tetto che compensa il consumo energetico annuale, rendendo questa una struttura a zero emissioni nette;
- accumulo termico a labirinto - Le strutture massicce e sfalsate in calcestruzzo nel vespaio del seminterrato accumulano energia termica per il riscaldamento e il raffreddamento passivo dell'edificio. L'edificio comprende per l'appunto un grande labirinto termico sotto le due ali principali degli uffici. Il labirinto può accumulare il calore proveniente dai collettori solari traspiranti sulle facciate sud dell'edificio. Questo calore viene utilizzato per temperare passivamente l'aria di ventilazione durante la stagione di riscaldamento. Il labirinto funge anche da dissipatore termico per il calore respinto dal centro dati dell'edificio, riducendo drasticamente il carico di raffreddamento del centro dati durante tutto l'anno. Il modello energetico estremamente dettagliato dell'edificio prevede un'intensità di consumo energetico di 33 kBtu/ft<sup>2</sup>/anno. L'impianto fotovoltaico in loco è dimensionato per soddisfare l'energia netta del sito con un'intensità di consumo energetico di 35 kBtu/ft<sup>2</sup>/anno.

#### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO

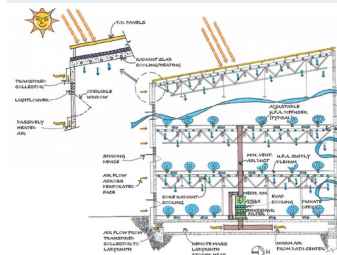


Fig.5 Sezione bioclimatica con una varietà di strategie di riscaldamento, raffreddamento e ventilazione

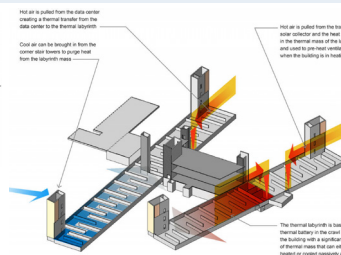


Fig.6 Il labirinto del seminterrato dell'RSF funge da batteria termica

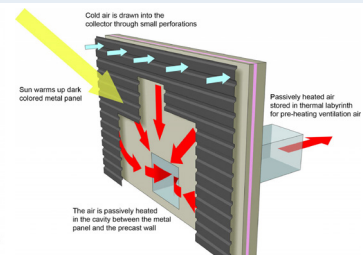


Fig.7 Schema di funzionamento del collettore solare traspirante



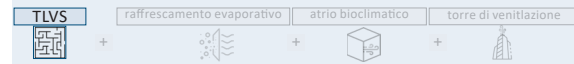
Fig.8 Sezione bioclimatica con una varietà di strategie di riscaldamento, raffreddamento e ventilazione:  
1 – paesaggio permeabile, 2 – vetri termocromici orientati a est, 3 – fresca assunzione ar, 4 – parasole a persiana, 5. uffici aperti a basso profilo, 6 – aria, dati e alimentazione sottopavimento, 7 – vernice riflettente per interni, pavimenti, postazioni di lavoro, 8 – lastre per pavimento radiante, 9 – collettore solare traspirante sulla facciata sud (non mostrato), 10 1,6 mw di fotovoltaico, 11 – muro di legno scultoreale per uccidere gli scarabei, 12 – finestre elettrocromatiche orientate a ovest (non in scambio termico con il terreno), 13 – uffici con soffitto aperto, 14 – tubo gas naturale riutilizzato, 15 – labirinto di massa termica del seminterrato



Fig.9 Fase di costruzione. L'immagine evidenzia la realizzazione delle strutture in calcestruzzo e degli elementi lineari del sistema ipogeo di ventilazione, utilizzati per il preriscaldamento dell'aria attraverso lo

#### DATI

Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



#### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

##### Integrazione della tecnologia



##### Grado di durabilità



##### Prestazioni energetiche



##### Manutenzione



##### Risparmio fabbisogno energetico



##### Costo di messa in opera



##### Comfort indoor



##### Tempi di realizzazione

lunghi



*Figura 4.10* Vista dell'ingresso della Planet Earth Gallery, progettata da Feilden Clegg Bradley Studios a Doncaster, Regno Unito. L'ampia copertura reticolare in acciaio e legno crea uno spazio di transizione tra esterno e interno, generando una zona ombreggiata di accoglienza e contribuendo alla definizione dell'identità architettonica dell'edificio all'interno del contesto del parco. Fonte: Feilden Clegg Bradley Studios, Planet Earth Gallery, Doncaster, Regno Unito.

#### Caso studio 4: Planet Earth Gallery, Feilden Clegg Bradley Studios, Doncaster, Regno Unito

L'Earth Centre è stato un grande centro educativo dedicato alla sostenibilità situato a Conisbrough, South Yorkshire (Regno Unito), costruito su un ex sito minerario di circa 160 ettari e inaugurato nel 1999 come progetto del Millennium Commission. Il complesso rappresentava un'importante operazione di rigenerazione ambientale di un'area industriale dismessa e comprendeva un parco ecologico, spazi espositivi, edifici educativi e strutture per visitatori. Il costo complessivo del progetto è stato di circa £50 milioni, finanziato anche dall'Unione Europea e da programmi di sviluppo regionale. Tra gli edifici principali del complesso vi erano le Planet Earth Galleries, progettate come spazi espositivi sotterranei integrati nel paesaggio. L'architettura utilizzava strategie di progettazione ambientale avanzate per l'epoca, tra cui edifici parzialmente interrati, produzione energetica da fonti rinnovabili e sistemi passivi di ventilazione e climatizzazione. Il progetto includeva inoltre una grande solar canopy fotovoltaica, che all'epoca rappresentava uno dei più grandi impianti solari installati nel Regno Unito.

#### Tecnologie e TLVS

Il complesso è stato progettato come dimostrazione delle potenzialità dell'architettura sostenibile, integrando numerose strategie passive di controllo climatico. Tra le principali soluzioni adottate figurano:

- edifici earth-sheltered, con gran parte dei volumi inseriti nel terreno per sfruttare la massa termica del suolo
- ventilazione naturale e distribuzione dell'aria attraverso sistemi sotterranei
- produzione di energia rinnovabile tramite fotovoltaico nella struttura della solar canopy
- involucro ad alta massa termica e forte integrazione con il paesaggio circostante

Il sistema labirintico è stato realizzato abbassando la soletta principale di circa 1,5 m per consentire l'inserimento di un labirinto in calcestruzzo sotto la pavimentazione. La massa termica delle strutture e l'ampia superficie interna del calcestruzzo consentono di stabilizzare le condizioni microclimatiche. È stato dimostrato che tale configurazione garantisce condizioni interne confortevoli con emissioni di carbonio sensibilmente ridotte rispetto alla ventilazio-



ne naturale convenzionale. Il sistema è integrato con ulteriori dispositivi bioclimatici, come il Solar Canopy, che fornisce fino a un terzo dell'energia richiesta dalla galleria e dalle strutture annesse. La combinazione di massa termica, ventilazione labirintica e copertura solare rappresenta un esempio concreto di come il TLVS possa essere declinato in contesti museali e culturali, con prestazioni sia energetiche sia educative.

Rilevanza per la ricerca

Il caso dell'Earth Centre rappresenta uno dei primi esempi di applicazione su larga scala del Thermal Labyrinth Ventilation System in edifici pubblici destinati ad attività culturali ed educative. Il sistema dimostra come la combinazione tra massa termica del terreno, ventilazione passiva e integrazione architettonica con il paesaggio possa garantire condizioni di comfort interno senza ricorrere a sistemi di climatizzazione energivori. Dal punto di vista della ricerca sui TLVS, il progetto è particolarmente rilevante perché mostra l'efficacia di questa tecnologia in edifici con grandi spazi interni e carichi termici variabili, come gallerie espositive e musei. L'esperienza dell'Earth Centre ha inoltre contribuito allo sviluppo successivo di sistemi di ventilazione passiva basati su labirinti termici, utilizzati in diversi edifici contemporanei ad alte prestazioni energetiche.

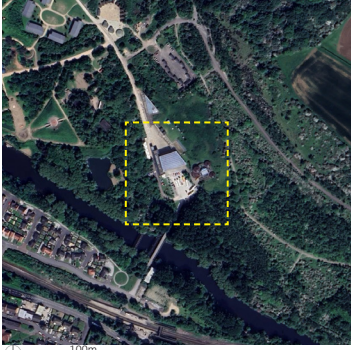
*Figura 4.11 The Earth Centre Galleries, progetto di Atelier Ten, realizzato presso il The Earth Centre. L'intervento si distingue per l'ampia copertura reticolare in legno lamellare e acciaio, concepita come dispositivo bioclimatico in grado di modulare ombreggiamento, ventilazione naturale e controllo microclimatico degli spazi aperti e semi-coperti. Fonte: Atelier Ten, "The Earth Centre Galleries".*





CS\_04 Planet Earth Gallery

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
Feilden Clegg Bradley Studios  
**ANNO**  
1999  
**LUOGO**  
Doncaster, Regno Unito  
**AREA**  
300 acri  
**COSTO**  
£25 milioni  
**DESTINAZIONE D'USO**  
Galleria d'arte



LOCALIZZAZIONE



**coordinate** 53°31'N 1°08'W  
**altitudine** 15 m s.l.m.  
**densità** 694,48 ab./km<sup>2</sup>  
**zona climatica** Cfb\* (climi caldi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

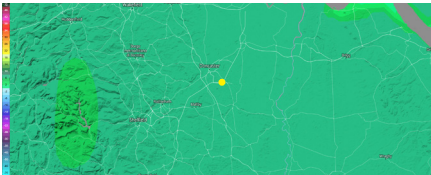
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



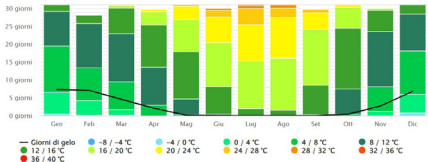
Nella città di Doncaster, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 24% e il 26%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



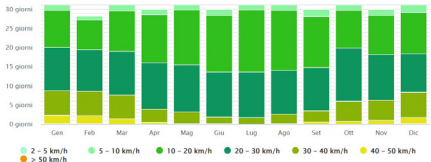
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Doncaster sono tra i 14 e i 16°C.

Temperature massime



Durante l'anno, la temperatura in genere va da 2 °C a 22 °C ed è raramente inferiore a -3 °C o superiore a 27 °C.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 5,7 mesi, con velocità medie del vento di oltre 18,8Km/h. Il mese più ventoso dell'anno è gennaio, con una velocità oraria media del vento di 21,8 Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista esterna dell'edificio



Fig.2 Vista della facciata esterna dell'edificio



Fig.3 Interno dell'edificio sala ristorazione



Fig.4 Interno dell'edificio sala esposizioni

CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:  
2002- RIBA Award

FONTI:  
<https://www.atelierten.com/projects/the-earth-centre-galleries>  
<https://fcbstudios.com/projects/solar-canopy-the-earth-centre/>  
<https://grant-associates.uk.com/projects/earth-centre>

## CS\_04 Planet Earth Gallery

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Questo storico progetto del millennio è stato aperto al pubblico nel 1999; un'attrazione turistica da 50 milioni di sterline e un parco ecologico che coprono 160 ettari di un'ex miniera di carbone nel South Yorkshire. L'intero progetto si basa sui principi di efficienza energetica, risparmio idrico, riciclaggio e utilizzo di materiali non inquinanti per fornire le basi per uno sviluppo sostenibile. È caratterizzato da una rete completamente integrata di gestione delle acque che incorpora la raccolta dell'acqua piovana e il trattamento, lo stoccaggio e il riciclaggio dell'acqua per l'uso nell'irrigazione e nelle fontane e come habitat per la fauna selvatica. Uno dei principali progetti del Millennio, l'Earth Centre, ha visto la costruzione di un centro nazionale per l'istruzione, l'informazione e l'intrattenimento nel campo dell'ambiente e della sostenibilità. Verso la fine degli anni '90 abbiamo sviluppato il primo accumulatore di energia disaccoppiato a labirinto su larga scala per l'Earth Centre. Gli edifici dell'Earth Centre rappresentavano esempi di design sostenibile e a basso consumo energetico. La Planet Earth Gallery, sepolta nella terra, incorporava un enorme sistema sotterraneo di distribuzione dell'aria e di accumulo termico integrato nelle fondamenta, noto come labirinto.

### SISTEMI TECNOLOGICI

La Planet Earth Gallery, sepolta nella terra, incorporava un enorme sistema sotterraneo di distribuzione dell'aria e di accumulo termico integrato nelle fondamenta, noto come labirinto.

L'aria fornita all'edificio veniva aspirata attraverso il labirinto, raffreddando attivamente l'aria di mandata in estate e riscaldandola in inverno. Di conseguenza, l'edificio aveva condizioni interne altamente confortevoli con emissioni di carbonio inferiori rispetto alla ventilazione naturale, evitando al contempo la necessità di sistemi di aria condizionata.

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO



Fig.5 Vista panoramica dall'alto del contesto circostante all'edificio

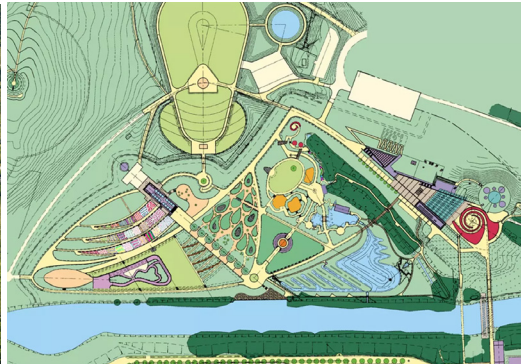


Fig.6 Planimetria di futuro progetto dell'area di Conisbrough (contornato in giallo)



Fig.7 Immagine della costruzione dell'edificio e della pensilina solare

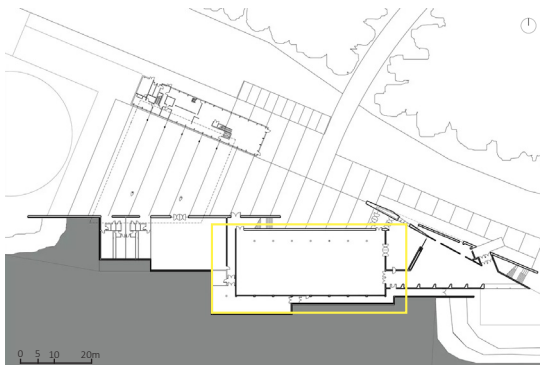


Fig.8 Pianta piano terra, evidenziando in giallo la posizione sotterranea del labirinto d'aria

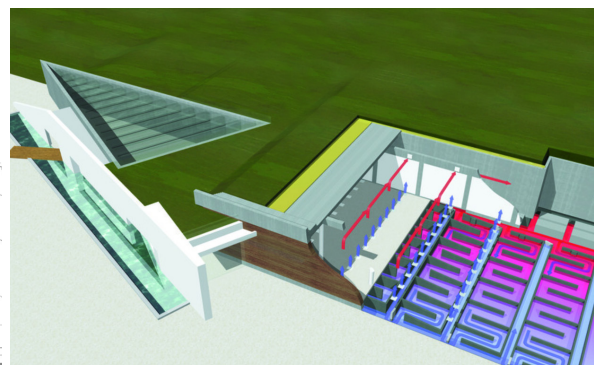
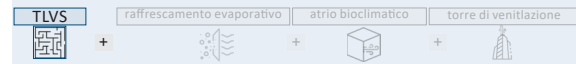


Fig.9 Schema di principio della ventilazione a labirinto e il suo effetto sulla riduzione della temperatura dell'aria di ventilazione al centro della Terra

### DATI

#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

#### Integrazione della tecnologia



#### Grado di durabilità



#### Prestazioni energetiche



#### Manutenzione



#### Risparmio fabbisogno energetico



#### Costo di messa in opera



#### Comfort indoor



#### Tempi di realizzazione

medio-brevi



### Caso studio 5: Nanaimo Regional General Hospital, Stantec, Isola di Vancouver, Canada

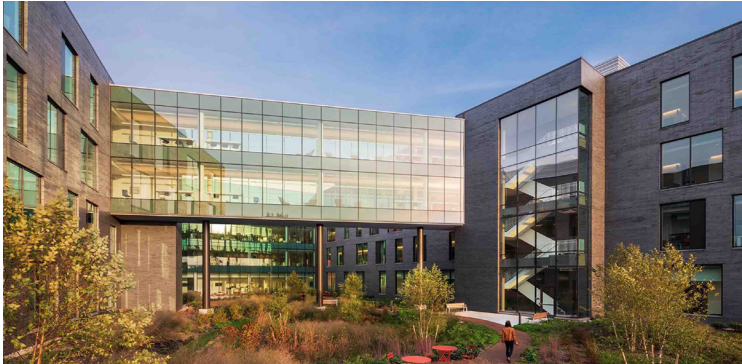
Il Nanaimo Regional General Hospital (NRGH) si trova a Nanaimo, nella Columbia Britannica (Canada) ed è il principale ospedale della regione centrale di Vancouver Island. L'edificio analizzato nei casi studio energetici riguarda in particolare la nuova espansione del dipartimento di emergenza, completata nel 2018 come parte di un più ampio programma di modernizzazione della struttura sanitaria. Il progetto ha previsto la realizzazione di un nuovo edificio per emergenze e servizi clinici con una superficie di circa 4.600 m<sup>2</sup>, progettato per migliorare la resilienza energetica dell'ospedale e ridurre il consumo energetico complessivo della struttura. L'intervento è stato sviluppato con un investimento di circa 36 milioni di dollari canadesi e rappresenta uno dei primi esempi in Canada di integrazione di strategie avanzate di climatizzazione passiva in edifici sanitari. Dal punto di vista climatico, Nanaimo è caratterizzata da un clima oceanico temperato (Köppen Cfb) con inverni miti e umidi ed estati relativamente fresche. Queste condizioni climatiche favoriscono l'utilizzo di strategie di ventilazione naturale e sistemi passivi di pre-condizionamento dell'aria per ridurre i carichi energetici dei sistemi HVAC.

#### Tecnologie e TLVS

Il progetto integra una serie di strategie energetiche e ambientali finalizzate a migliorare l'efficienza energetica dell'edificio e la resilienza del sistema sanitario locale. Tra le principali strategie adottate figurano:

*Figura 4.12* Vista a volo d'uccello del nuovo complesso del Nanaimo Regional General Hospital. Fonte: Stantec, Nanaimo Regional General Hospital, Vancouver Island, Canada.





*Figura 4.13 Vista della corte interna del complesso. Gli edifici sono organizzati attorno a uno spazio verde centrale che favorisce la qualità ambientale e la fruizione degli spazi aperti; passerelle vetrate sovrapposte collegano i diversi volumi garantendo continuità funzionale e illuminazione naturale agli ambienti interni.*

*Fonte: Stantec, Nanaimo Regional General Hospital, Vancouver Island, Canada.*

- involucro altamente isolato per ridurre le dispersioni termiche
- struttura in legno massiccio (mass timber) che contribuisce alla riduzione delle emissioni di carbonio incorporate
- sistemi di ventilazione ad alta efficienza con recupero di calore
- sistemi di controllo avanzato dell'edificio (BMS) per ottimizzare la gestione energetica

A differenza di altri casi analizzati, al NRGH non risulta implementato un vero e proprio Thermal Labyrinth Ventilation System. Le strategie adottate si concentrano su interventi più convenzionali, come l'uso estensivo della luce naturale, sistemi di ventilazione naturale integrata, schermature solari, isolamento termico del tetto e miglioramenti dell'efficienza dell'involucro. Queste soluzioni, pur efficaci, non sfruttano pienamente il potenziale della massa termica per la mitigazione passiva dei carichi interni. L'assenza del TLVS rende questo caso particolarmente utile come termine di confronto: evidenzia i limiti dei sistemi tradizionali in contesti ospedalieri complessi e suggerisce come l'integrazione di un labirinto termico potrebbe contribuire ad aumentare comfort, resilienza ed efficienza energetica in strutture di grande scala.

Rilevanza per la ricerca

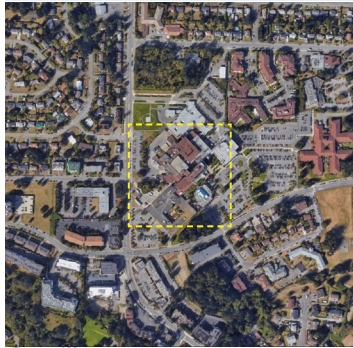
L'integrazione del TLVS in questo progetto dimostra come il precondizionamento passivo dell'aria tramite massa termica del terreno possa ridurre i carichi energetici dei sistemi HVAC anche in edifici con elevati standard di ventilazione come gli ospedali. Inoltre, l'applicazione del sistema in un edificio sanitario evidenzia il potenziale del TLVS nel migliorare la resilienza energetica delle infrastrutture critiche, garantendo condizioni di comfort indoor più stabili anche in condizioni operative complesse.



*Figura 4.14 Vista interna di un corridoio del Nanaimo Regional General Hospital, progettato da Stantec sull'Isola di Vancouver, Canada. Fonte: Stantec, Nanaimo Regional General Hospital, Vancouver Island, Canada.*

## CS\_05 Nanaimo Regional General Hospital

## DATI DI PROGETTO



Stantec

Stantec

ANNO

2012

LUOGO

Isola di Vancouver, Canada

## AREA

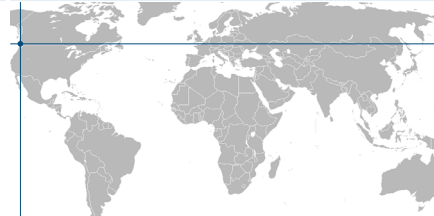
10.000 mg

**COSTO**  
22 milioni di sterline (37 ml di dollari canadesi)

**DESTINAZIONE D'USO**  
pronto soccorso dell'ospedale



## LOCALIZZAZIONE



**coordinate** 49°36'N 125°30'W

**altitudine** 2.198 m s.l.m.

**densità** 22 ab./km<sup>2</sup>

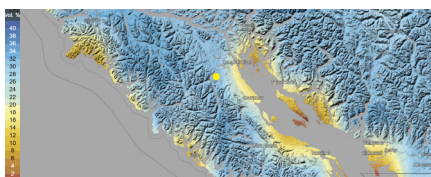
**zona climatica** Cfb\* (climi caldi e temperati)

\*secondo il sistema Köppen-Geiger

## DATI CLIMATICI

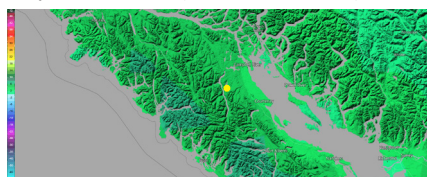
<https://it.climate-data.org>    <https://www.meteoblue.com>

**Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)**



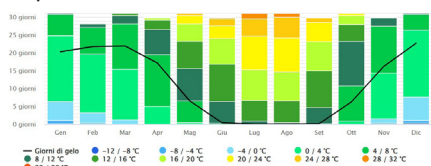
Nell' Isola di Vancouver, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 30% e il 32%.

**Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)**



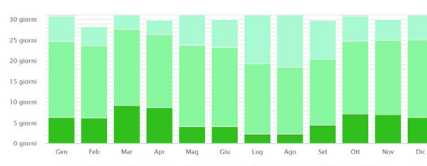
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo dell'Isola di Vancouver, sono tra i 14 e i 16°C

## Temperature massime



Durante l'anno, la temperatura in genere va da 3 °C a 19 °C ed è raramente inferiore a -1 °C o superiore a 23 °C.

### Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 6,1 mesi, con velocità medie del vento di oltre 13,1 Km/h. Il mese più ventoso dell'anno è dicembre, con una velocità oraria media del vento di 16,8 Km/h.

## IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista a volo d'uccello dell'edificio



Fig.2 Vista a volo d'uccello dell'edificio



Fig.3 Interno del nuovo pronto soccorso



Fig.4 Interno dell'edificio

CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:  
-LEED Gold

FONTI:  
<https://www.cibsejournal.com/technical/ashrae-conference-cooling-seminars/>  
<https://greenhealthcare.ca/resiliency/images/publications/2-Resiliency-Profile-Nanaimo.pdf>  
<https://www.naturallywood.com/projects/nanaimo-regional-general-hospital-emergency-department/>  
[https://www.youtube.com/watch?v=eynos88\\_wGo](https://www.youtube.com/watch?v=eynos88_wGo)



## CS\_05 Nanaimo Regional General Hospital

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

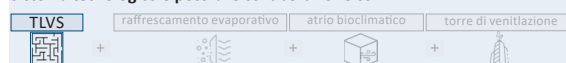
Il Nanaimo Regional General Hospital (NRGH) serve gli abitanti del distretto regionale di Nanaimo. L'Area Sanitaria Locale di Nanaimo fa parte di Island Health, l'autorità provinciale responsabile della fornitura di servizi sanitari sull'Isola di Vancouver. La Provincia di BC, il Distretto Ospedaliero Regionale di Nanaimo (Nanaimo RHD) e altre fonti, come le fondazioni di beneficenza, forniscono fondi comuni a Island Health per mantenere, migliorare e costruire strutture sanitarie nella regione.

### SISTEMI TECNOLOGICI

I progettisti hanno incorporato un labirinto termico per fornire raffreddamento e riscaldamento per la struttura da 22 milioni di sterline (37 milioni di dollari canadesi) di 10.000 m<sup>2</sup>. Il progetto includeva un nuovo pronto soccorso psichiatrico e un'unità di terapia intensiva psichiatrica, oltre al pronto soccorso esistente. L'idea era di portare la natura all'interno dell'edificio ovunque possibile. Il piano basato sul cortile incorporava l'accesso visivo agli spazi verdi e le finiture superficiali facevano ampio uso di materiali naturali. In termini di comfort termico, il progetto ha utilizzato l'intero vuoto del seminterrato come labirinto termico, per pre-raffreddare o pre-riscaldare l'aria di mandata. Lo ha fatto immagazzinando il calore del giorno o il fresco della notte e sfruttando l'intervallo diurno. La ventilazione a spostamento, che richiede temperature di mandata moderate, era una buona corrispondenza per il sistema a labirinto e, tramite la modellazione CFD, si è dimostrata adatta a soddisfare i requisiti di distribuzione dell'aria. Questo è stato utilizzato insieme al riscaldamento e al raffreddamento radiante di alto livello impiegando una valvola a 6 vie per consentire il cambio stagionale. È stata prestata particolare attenzione per prevenire la condensa sui pannelli radianti di raffreddamento assicurando che la temperatura dell'acqua refrigerata fosse sempre maggiore della temperatura del punto di rugiada dell'aria, controllata tramite feedback dai sensori sul tubo di alimentazione del pannello. Il risparmio annualizzato derivante dal labirinto termico ammonta a £ 2.700 (CA \$ 4.780), un valore vicino a quanto previsto nell'esercizio di modellazione pre-costruzione.

### DATI

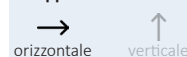
#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



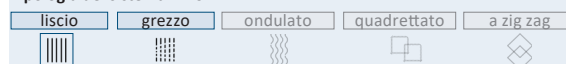
#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

#### Integrazione della tecnologia



#### Grado di durabilità



#### Prestazioni energetiche



#### Manutenzione



#### Risparmio fabbisogno energetico



#### Costo di messa in opera



#### Comfort indoor



#### Tempi di realizzazione

medio-lunghi

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO



Fig.5 Modello volumetrico dell'edificio



Fig.6 estratto da video descrittivo interno del labirinto d'aria ([https://www.youtube.com/watch?v=eynos88\\_wGo](https://www.youtube.com/watch?v=eynos88_wGo))



Fig.7 Il labirinto termico si trova nel seminterrato del nuovo edificio del pronto soccorso. I contenitori pieni d'acqua aumentano la massa termica accessibile, ma i requisiti sismici hanno ridotto l'efficacia di questi contenitori riutilizzati per la conservazione degli alimenti, poiché erano destinati a essere perpendicolari al flusso d'aria, con l'aria che passava attraverso i fori nelle "fossette"



Fig.8 L'attrezzatura del nuovo Centro di Energia Termica del NRGH



Fig.9 Fasi costruttive del TLVS, sequenza delle diverse fasi di realizzazione del labirinto. Dalle fondamenta alle prime strutture portanti, fino alla definizione degli elementi architettonici.



*Figura 4.15* Vista esterna dell'edificio caratterizzato da un volume compatto rivestito da un involucro metallico microforato che funge da seconda pelle climatica. Fonte: ArchDaily, Turkish Contractors Association HQ / Avci Architects.

#### Caso studio 6: Sede centrale Turkish Contractors Association (TMB), AVCI ARCHITECTS, Ankara, Turchia

La sede centrale della Turkish Contractors Association (TMB), progettata da Avci Architects in collaborazione con Atelier Ten, è stata completata nel 2013 a Çankaya, Ankara. L'edificio ha una superficie di costruzione totale di circa 7.138 m<sup>2</sup>, con una superficie destinata agli uffici di circa 4.817 m<sup>2</sup> e ospita spazi direzionali e rappresentativi, organizzati intorno a un atrio centrale e supportati da una serie di soluzioni tecnologiche avanzate. È stato concepito con l'obiettivo di ottenere una forte prestazione ambientale, risultando certificato LEED Platinum. Il contesto climatico di Ankara, caratterizzato da estati calde e secche e da inverni rigidi, con elevate escursioni termiche giornaliere, ha reso particolarmente rilevante l'integrazione di sistemi passivi in grado di modulare i flussi termici e ridurre il fabbisogno impiantistico.

##### Tecnologie e TLVS

L'edificio integra un sistema labirintico sotterraneo sotto il livello del parcheggio più basso sviluppato su un'area di circa 910 m, concepito per sfruttare le differenze di temperatura giorno-notte tipiche del clima di Ankara. La configurazione sfrutta la massa termica delle strutture in calcestruzzo e del terreno circostante per immagazzinare calore o frescura in funzione delle stagioni: in inverno, l'aria esterna viene preriscaldata, con incrementi medi di 4-6 °C rispetto alla temperatura ambiente, mentre in estate il sistema accumula aria notturna più fresca, rilasciandola nelle ore calde e riducendo fino al 30% il carico sugli impianti di raffrescamento. Il TLVS è integrato in una strategia più ampia che include travi fredde, sistemi radianti incorporati nei solai, facciata a doppia pelle con schermature solari, pannelli fotovoltaici e un sistema di gestione intelligente. L'involucro è curato: doppia pelle costituita da vetro trasparente internamente, e una maglia esterna in acciaio inossidabile per il controllo solare; isolamento elevato, serramenti ottimizzati, e ventilazione naturale tramite atrio centrale che crea effetto camino. Sono previste anche strategie passive attive come il night purge, uso di energia solare (fotovoltaico e collettori quando presenti), riciclo dell'acqua piovana e grigie, illuminazione LED efficiente. Complessivamente, l'edificio ha conseguito la certificazione LEED Platinum, con una riduzione dei consumi energetici globali superiore al 40% rispetto a un edificio di riferimento convenzionale.



#### Rilevanza per la ricerca

Il TMB Headquarters è particolarmente rilevante per la presente ricerca in quanto fornisce un esempio concreto di integrazione del TLVS in edifici per uffici di medio-grandi dimensioni situati in climi continentali caratterizzati da forti escursioni termiche. Il progetto dimostra come il labirinto, quando combinato con la massa termica strutturale e con un involucro ad alte prestazioni, possa garantire riduzioni significative del fabbisogno di raffrescamento senza compromettere la qualità ambientale interna. Inoltre, l'adozione congiunta di strategie passive (labirinto, night purge, ventilazione naturale attraverso l'atrio) e attive (chilled beams, sistemi radianti, doppia pelle ventilata) fornisce dati utili per valutare la compatibilità e l'efficacia di soluzioni ibride. Ciò consente di comprendere meglio non solo le potenzialità del TLVS come dispositivo autonomo, ma anche il suo ruolo in sistemi complessi di climatizzazione integrata, replicabili in contesti urbani mediterranei ad alta intensità energetica.

*Figura 4.16 Dettaglio del sistema di labirinto termico realizzato in calcestruzzo ad alta massa, progettato per favorire lo scambio termico tra aria e struttura prima dell'immissione negli ambienti interni. Fonte: ArchDaily, Turkish Contractors Association HQ / Avci Architects.*



CS\_06 Sede centrale Turkish Contractors Association (TMB)

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
AVCI ARCHITECTS  
**ANNO**  
2011-2013  
**LUOGO**  
Ankara, Turchia  
**AREA**  
3.500 mq  
**COSTO**  
15 milioni di euro  
**DESTINAZIONE D'USO**  
uffici



LOCALIZZAZIONE

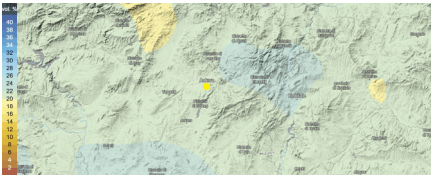


**coordinate** 39°54'42.12"N 32°50'25.08"E  
**altitudine** 938 m s.l.m.  
**densità** 2.241,29 ab./km²  
**zona climatica** Csa\* (climi caldi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

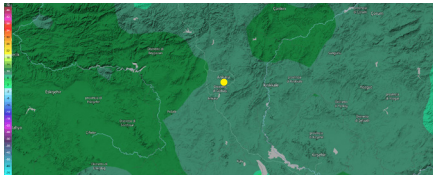
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



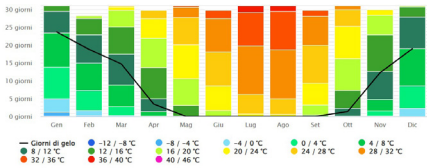
Nella città di Ankara, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 20% e il 22%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



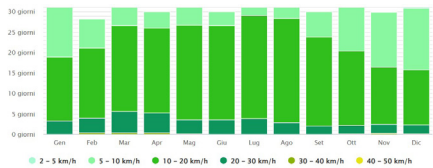
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Ankara sono tra i 10 e 12°C

Temperature massime



La stagione calda dura 3,2 mesi, con una temperatura giornaliera massima oltre 25 °C. Il mese più caldo dell'anno è luglio, con una T media max di 30 °C e min di 15 °C.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 2,7 mesi, con velocità medie del vento di oltre 11,5Km/h. Il giorno più ventoso dell'anno è febbraio, con una velocità oraria media del vento di 12,5 Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista della facciata laterale dell'edificio

Fig.2 Vista della facciata frontale dell'edificio

Fig.3 Dettaglio di esterno dell'edificio

Fig.4 Interno dell'edificio

CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:  
-2014- Building Award

SCHEDA 1, CS\_06



## CS\_06 Sede centrale Turkish Contractors Association (TMB)

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Situato nella capitale Ankara, il Turkish Contractor's Association HQ (TCA) è progettato su principi sostenibili sin dalle fondamenta e intende inviare un messaggio chiaro e orientato al futuro dall'industria edilizia turca al mondo intero. Dal primo labirinto sotterraneo moderno della Turchia per l'aria condizionata passiva, all'ombreggiatura meticolosamente progettata sulla facciata, l'edificio la dice lunga sulla possibilità di sistemi sostenibili fattibili, efficaci e progettati in modo collaborativo. È un'immagine architettonica che si erge sulla scena globale. L'aspirazione del cliente è quella di creare un design ambientale di prima categoria per lo sviluppo della sede centrale TMB che mira a raggiungere una valutazione ambientale LEED Gold secondo lo standard internazionale. Pertanto, l'edificio è stato progettato per adottare e utilizzare i modelli climatici e le risorse locali per ottimizzare le prestazioni ambientali dell'edificio.

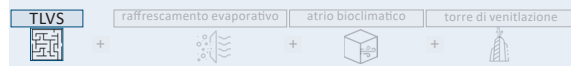
### SISTEMI TECNOLOGICI

Per soddisfare i desideri del cliente, è stato proposto un sistema di ventilazione ad alta efficienza energetica, che sfrutta ampiamente la massa termica per sfruttare la notevole differenza di temperatura tra il giorno e la notte ad Ankara. Un labirinto è costruito sotto il seminterrato dell'edificio per fungere da accumulo termico. Il contatto prolungato dell'aspirazione di aria fresca con il terreno e il cemento fornirà riscaldamento passivo in inverno e raffreddamento in estate. Un ciclo di spurgo notturno è utilizzato per dissipare l'accumulo di calore durante il giorno e pre-raffreddare il labirinto prima dell'inizio di ogni giorno.

La massa termica attiva sarà integrata sul pavimento dell'ufficio e abbinata a travi fredde attive. La massa termica è costituita da condotti di piccolo diametro gettati in lastre di cemento, che forniscono una superficie per assorbire i guadagni interni e allo stesso tempo utilizzano questo calore per riscaldare l'aria in ingresso negli spazi interni, riducendo quindi il consumo di energia nell'unità di trattamento aria. Il clima interno è accuratamente controllato dalle unità terminali delle travi fredde per garantire il comfort degli occupanti.

### DATI

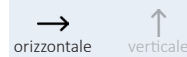
#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



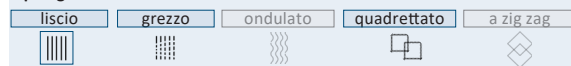
#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

#### Integrazione della tecnologia



#### Grado di durabilità



#### Prestazioni energetiche



#### Manutenzione



#### Risparmio fabbisogno energetico



#### Costo di messa in opera



#### Comfort indoor



#### Tempi di realizzazione

medio-lunghi

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO

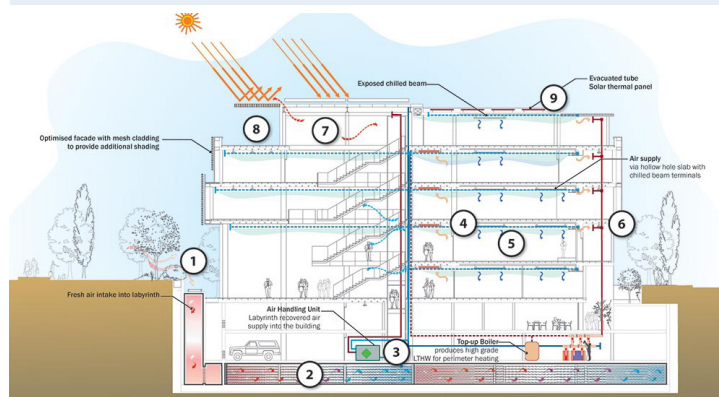


Fig.5 Diagramma del Funzionamento TLVS

1. L'aria calda nell'ambiente esterno passa dalle ciminiere al labirinto - 2. L'aria calda si raffredda naturalmente mentre percorre la distanza all'interno del labirinto - 3. L'aria che perde calore raggiunge le stazioni di condizionamento dell'aria in base alle condizioni, se necessario viene ulteriormente raffreddata - 4. L'aria che passa attraverso i canali incorporati nelle lastre R/C raffreddando anche la massa di calcestruzzo raggiunge le travi fredde - 5. La trave fredda a seconda delle esigenze nell'ambiente raffredda ulteriormente l'aria, rilasciandola all'interno - 6. L'aria riscaldata a causa dell'impatto di macchine e persone viene raccolta nei condotti di ventilazione e trasportata alle unità di recupero del calore - 7. L'atrio al centro dell'edificio con effetto camino raccoglie tutta l'aria riscaldata al livello più alto, trasportandola alle stazioni di recupero del calore, sempre tramite condotti - 8. Grazie alla maglia e agli elementi di ombra che formano l'esterno dell'edificio, il recupero del calore è ridotto al minimo - 9. Ci sono anche tubi dell'aria calda e pannelli fotovoltaici sul tetto.

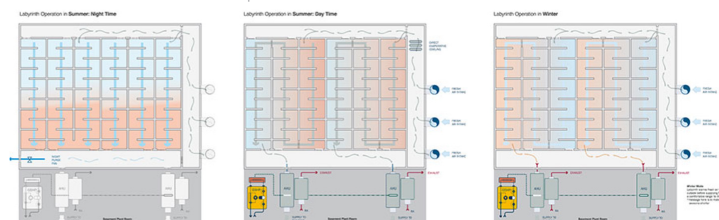


Fig.6 Diagramma del Funzionamento TLVS



Fig.7 Pareti interne del TLVS nel piano seminterrato



*Figura 4.17* L'edificio, parte del complesso biomedicale dell'Università di Oxford, è progettato secondo criteri di elevata efficienza energetica e controllo ambientale. Fonte: Make Architects, The Big Data Institute.

### Caso studio 7: Big Data Institute (BDI) dell'Università di Oxford, Make Architects, Oxford, Regno Unito

Il Big Data Institute (BDI), progettato da Make Architects e completato nel 2017, si trova presso l'Old Road Campus dell'Università di Oxford. Con una superficie complessiva di circa 7.400 m<sup>2</sup>, l'edificio ospita attività di ricerca e analisi avanzata dei dati biomedici, ponendosi come nodo centrale per la collaborazione interdisciplinare tra scienza, tecnologia e medicina. Il contesto climatico di Oxford è temperato oceanico, con estati relativamente miti e inverni freddi ma non estremi: condizioni che richiedono soluzioni in grado di garantire comfort e continuità operativa con un ridotto consumo energetico. In tale cornice, il progetto è stato impostato su criteri di sostenibilità ambientale, ottimizzazione delle risorse passive e riduzione del fabbisogno di raffrescamento legato sia all'uso intensivo degli spazi sia al calore generato dalle apparecchiature di ricerca.

#### Tecnologie e TLVS

Elemento distintivo del progetto è l'integrazione di un labirinto termico in calcestruzzo sotterraneo, collocato al di sotto del livello dell'edificio e sviluppato per una lunghezza complessiva di circa 600 metri. L'aria esterna viene convogliata attraverso il labirinto, dove si stabilizza attorno a una temperatura di circa 12 °C grazie alla massa termica del suolo e delle strutture in calcestruzzo. In estate questo processo consente un abbattimento della temperatura dell'aria di ingresso pari a circa 3-4 °C, riducendo in modo signifi-

*Figura 4.18* Vista dell'atrio interno del Big Data Institute (BDI) dell'Università di Oxford. Fonte: Make Architects, Big Data Institute, University of Oxford, Oxford, UK.





*Figura 4.19 Vista degli spazi comuni e dell'atrio del Big Data Institute (BDI) dell'Università di Oxford. Fonte: Make Architects, Big Data Institute, University of Oxford, Oxford, UK.*

ficativo il carico dei sistemi di raffrescamento meccanico, mentre in inverno il labirinto contribuisce al preriscaldamento dell'aria. Il sistema è integrato con ulteriori strategie di efficienza ambientale: atri centrali e lucernari che favoriscono la ventilazione naturale e l'effetto camino, facciate ottimizzate per l'ingresso della luce naturale e superfici interne in calcestruzzo esposto per aumentare la capacità di accumulo termico.

#### Rilevanza per la ricerca

Il BDI rappresenta un caso emblematico per lo studio del TLVS in edifici di ricerca ad alta intensità tecnologica. Il sistema dimostra come un labirinto sotterraneo possa essere adattato a un contesto accademico complesso, garantendo continuità operativa e comfort termo-igrometrico senza un eccessivo ricorso a sistemi meccanici. I dati numerici disponibili — temperatura stabile intorno ai 12 °C e abbattimento di 3-4 °C dell'aria in ingresso estiva — offrono un riferimento quantitativo concreto per valutare l'efficacia del TLVS in climi temperati. Inoltre, la combinazione tra labirinto, massa termica e strategie di ventilazione naturale costituisce un modello replicabile in edifici di grandi dimensioni, con un impatto diretto sulla riduzione del fabbisogno energetico e sulla resilienza climatica delle strutture universitarie e direzionali.



CS\_07 Big Data Institute (BDI)

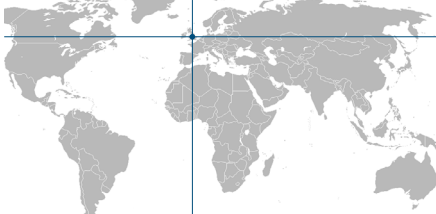
DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
Make Architects  
**ANNO**  
2017  
**LUOGO**  
Oxford, Regno Unito  
**AREA**  
7.500 mq  
**COSTO**  
Confidenziale  
**DESTINAZIONE D'USO**  
campus biomedico



LOCALIZZAZIONE

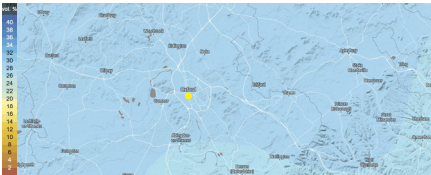


**coordinate** 51°45'07"N 1°15'28"W  
**altitudine** 61 m s.l.m.  
**densità** 3.506,5 ab./km<sup>2</sup>  
**zona climatica** Cfb\* (climi caldi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

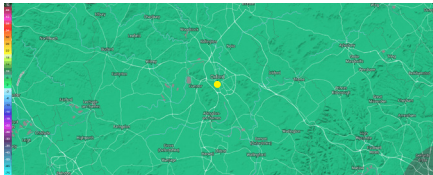
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



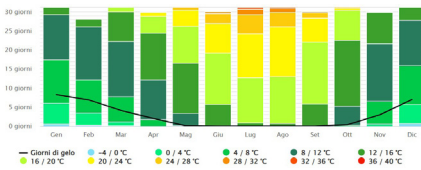
Nella città di Oxford, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 28% e il 30%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



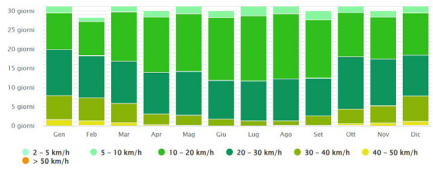
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Oxford sono tra i 8 e i 10°C

Temperature massime



La stagione calda dura 2,8 mesi, con una T°C giornaliera max oltre 19 °C. Il mese più caldo dell'anno è luglio, con una T media max di 21 °C e min di 12 °C.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 5,5 mesi, con velocità medie del vento di oltre 18,5 Km/h. Il mese più ventoso dell'anno è gennaio, con una velocità oraria media del vento di 21,0 Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista a volo d'uccello dell'edificio



Fig.2 Vista della facciata frontale dell'edificio



Fig.3 Interno dell'edificio



Fig.4 Interno dell'edificio

CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:  
-BREEAM Outstanding con punteggio di 86,5%

FONTI:  
<https://www.makearchitects.com/projects/the-big-data-institute/>  
<https://www.archdaily.com/536258/big-data-institute-revealed-for-university-of-oxford>  
<https://www.makearchitects.com/thinking/exploring-thermal-labyrinth-ventilation-systems-big-data-institute-university-of-oxford/>

## CS\_07 Big Data Institute (BDI)

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Make Architects ha completato il suo quinto progetto per l'Università di Oxford, un nuovo edificio di ricerca medica dedicato alla ricerca complessa e analitica sulle cause, le conseguenze, la prevenzione e il trattamento delle malattie. Ospitando 552 persone, l'edificio di 7.500 m<sup>2</sup> è stato specificamente progettato per assistere con l'archiviazione, l'analisi e l'elaborazione di enormi quantità di dati con l'obiettivo di fornire nuove informazioni su malattie e trattamenti in tutto il mondo. Una vasta sala server fornisce una potenza di calcolo sufficiente per 600 trilioni di calcoli al secondo. Quattro livelli di spazi per uffici sono disposti attorno a un atrio illuminato dall'alto. Ogni piano ha un mix di uffici cellulari perimetrali e generosi spazi open space intervallati da aree sociali e di breakout di alta qualità per promuovere diversi metodi di lavoro e collaborazione.

### SISTEMI TECNOLOGICI

Il Big Data Institute è il primo edificio di ricerca del Regno Unito a utilizzare un "labirinto" come parte di una strategia di raffreddamento passivo. Il BDI è un edificio innovativo che utilizza un labirinto termico sotterraneo che utilizza la temperatura stabile del terreno per precondizionare l'aria prima che entri nelle unità di trattamento dell'aria. Ciò riduce significativamente l'energia meccanica necessaria per condizionare l'aria. Quando è richiesta energia meccanica aggiuntiva, sistemi come la cogenerazione (CHP), i refrigeratori ad assorbimento (refrigeratori alimentati a calore e non a elettricità), i refrigeratori ad aria secca (COP molto elevato) e il fotovoltaico (PV) vengono orchestrati per fornire rendimenti di efficienza massimi. Un labirinto sotterraneo di 600 m è situato sotto il piano interrato che aspira aria attraverso il pozzo di luce dell'atrio e utilizza la massa termica del calcestruzzo, che è relativamente costante a 12 °C, per regolare le temperature in estate e in inverno prima di farla circolare nella sala macchine principale sul tetto. Quest'aria viene quindi distribuita tramite plenum del pavimento ed estratta tramite l'atrio utilizzando l'effetto camino. Il BDI è uno dei pochi edifici nel Regno Unito che utilizzano un labirinto per il raffreddamento ed è il primo edificio di ricerca del Regno Unito a utilizzarne uno.

### DATI

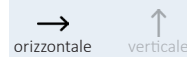
#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

#### Integrazione della tecnologia



#### Prestazioni energetiche



#### Risparmio fabbisogno energetico



#### Comfort indoor



#### Grado di durabilità



#### Manutenzione



#### Costo di messa in opera



#### Tempi di realizzazione

medio-lunghi

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO

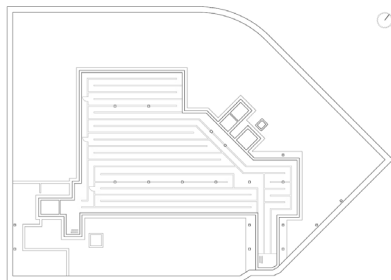


Fig.5 Pinata del piano seminterrato con la rappresentazione grafica del TLVS



Fig.6 Pianta del piano terra evidenziando con un tratteggio il posizionamento del TLVS del piano seminterrato

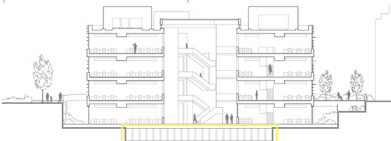


Fig.7 Sezione longitudinale evidenziando il giallo il TLVS

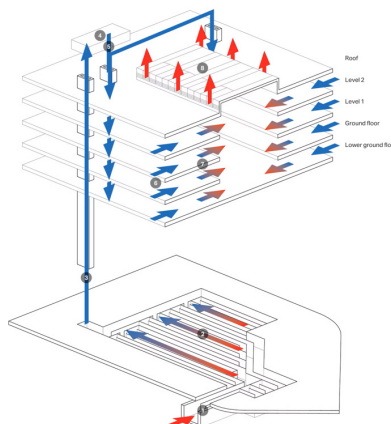


Fig.8 Diagramma del funzionamento del TLVS:  
1 Ingresso aria al labirinto- 2 Raffreddato ad aria nel labirinto- 3 L'aria sale all'unità di trattamento aria- 4 Aria condizionata- 5 Aria distribuita alle piastre di base- 6 L'aria passa attraverso le aperture di ventilazione- 7 L'aria passa nell'atrio- 8 Aria espulsa attraverso il tetto

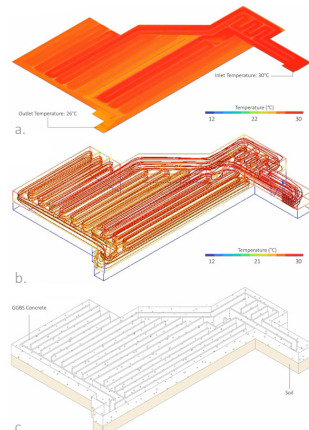


Fig.9 Simulazioni CFD: progettazione originale con tre persorsi  
a. mappa della distribuzione della temperatura  
b. tracce del percorso del flusso  
c. strati materiali e pianta struttura



Fig.10 Realizzazione delle pareti interne del TLVS nel piano seminterrato



Fig.11 Realizzazione e installazione della facciata prefabbricata



*Figura 4.20 Biggin Hill Memorial Museum, progetto di Ritchie Daffin, Biggin Hill (Regno Unito). Fonte: Ritchie Daffin, Biggin Hill Memorial Museum.*

#### Caso studio 8: Museo commemorativo di Biggin Hill, Robin Lee Architecture, Bromley, Regno Unito

Il Biggin Hill Memorial Museum, progettato dallo studio Robin Lee Architecture e situato presso il RAF Biggin Hill Airfield, è un centro espositivo dedicato alla memoria storica della celebre base aerea britannica durante la Seconda Guerra Mondiale. In particolare, il museo documenta il ruolo strategico svolto da Biggin Hill nel corso della Battaglia d'Inghilterra, uno degli eventi più significativi del conflitto, durante il quale la stazione aerea rappresentò un nodo fondamentale per le operazioni della Royal Air Force.

Il nuovo edificio museale si colloca in prossimità della St George's Chapel of Remembrance, edificio classificato Grade II, costruito nel 1951 per volontà di Winston Churchill come luogo commemorativo dedicato ai piloti caduti. La presenza di questo edificio storico ha fortemente influenzato l'impostazione progettuale del museo, imponendo una particolare attenzione al rapporto tra nuova architettura e contesto memoriale esistente.

Dal punto di vista architettonico, il progetto è stato concepito per inserirsi con discrezione nel paesaggio circostante e per non com-



petere visivamente con la cappella storica. Per questo motivo, l'edificio si sviluppa con volumetrie contenute e altezze costanti, mantenendosi volutamente basso e orizzontale rispetto al contesto. Questa scelta consente al museo di integrarsi nel sito senza alterarne la gerarchia simbolica, lasciando alla cappella il ruolo di elemento dominante all'interno del complesso commemorativo.

#### Tecnologie e TLVS

Questo museo include un thermal labyrinth ventilation system interrato che serve per supportare la ventilazione naturale a basso consumo, con ventilazione assistita da ventilatori quando necessario. È descritto che il museo ha ottenuto una certificazione energetica di classe "A" (Energy Performance Certificate) grazie a questo sistema labirintico che aiuta a raffrescare l'edificio.

Le fonti disponibili descrivono il sistema in termini generali, facendo riferimento a ventilazione naturale assistita e a strategie di raffrescamento passivo, senza tuttavia fornire parametri tecnici puntuali. Questa limitata disponibilità di dati rappresenta una condizione piuttosto comune in molti progetti contemporanei che adottano soluzioni di ventilazione passiva integrate nell'architettura.

#### Rilevanza per la ricerca

Il Biggin Hill Memorial Museum è di grande interesse per la ricerca perché rappresenta un caso in cui il TLVS è impiegato in un contesto culturale e commemorativo, non solo come dispositivo tecnico o scientifico. Permette di studiare come strategie passive come il labirinto termico possano essere adattate a tipologie edilizie sensibili dal punto di vista estetico e storico, dove l'integrazione deve rispettare un equilibrio con edifici preesistenti protetti (la cappella). Anche se mancano dati numerici completi, la classificazione energetica "A" e le descrizioni confermano che il sistema produce un impatto energetico positivo. Questo caso aiuta a capire limiti pratici di applicazione del TLVS, come trasparenza delle prestazioni, accettabilità estetica, coordinamento con vincoli storici, che sono essenziali per definire linee guida replicabili nei casi studio futuri.

CS\_08 Museo commemorativo di Biggin Hill

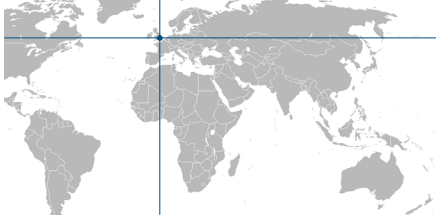
DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
Robin Lee Architecture  
**ANNO**  
2019  
**LUOGO**  
Bromley, Regno Unito  
**AREA**  
500 mq  
**COSTO**  
Confidenziale  
**DESTINAZIONE D'USO**  
Museo



LOCALIZZAZIONE

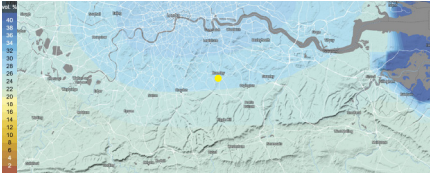


**coordinate** 51°24'23.2"N 0°01'05.9"E  
**altitudine** 4 m s.l.m.  
**densità** 2 205,33 ab./km<sup>2</sup>  
**zona climatica** Cfb\* (climi caldi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

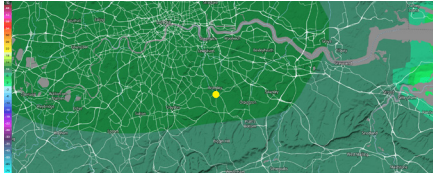
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



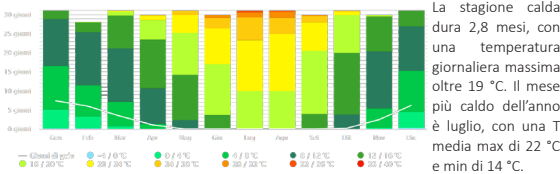
Nella città di Bromley, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 26% e il 28%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



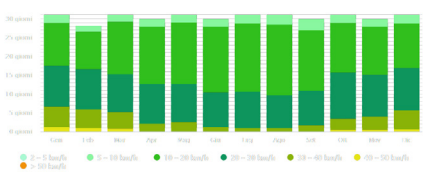
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Bromley sono tra i 10 e i 12°C

Temperature massime



La stagione calda dura 2,8 mesi, con una temperatura giornaliera massima oltre 19 °C. Il mese più caldo dell'anno è luglio, con una T media max di 22 °C e min di 14 °C.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 5,7 mesi, con velocità medie del vento di oltre 18,8 Km/h. Il mese più ventoso dell'anno è gennaio, con una velocità oraria media del vento di 21,7Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista della facciata frontale dell'edificio Fig.2 Vista della facciata posteriore dell'edificio

Fig.3 Interno dell'edificio

Fig.4 Interno dell'edificio

CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:  
N/B

SOURCE:  
<https://architizer.com/idea/1567400/>  
<https://www.blackmores.com.au/careers/our-working-environments/blackmores-campus?srsltid=AfmBOoqu2GoUNI4lrRrZdRVdN-ywXKTcbW1L-IRncQEK0Voiv8TilAe9>  
<https://www.wmkarchitecture.com/projects>



## CS\_08 Museo commemorativo di Biggin Hill

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Un nuovo museo racconta la storia della più famosa stazione di caccia britannica durante la Battaglia d'Inghilterra. Questo edificio di classe "A" è dotato di un labirinto termico sotterraneo per riscaldare o raffreddare passivamente lo spazio espositivo, riducendo così il consumo di energia. La nuova struttura in mattoni e legno a un piano adiacente alla St George's RAF Chapel of Remembrance espone una collezione e un'esposizione audiovisiva che racconta le storie personali di coloro che hanno prestato servizio presso l'aeroporto. L'esperienza dei visitatori include la cappella ristrutturata, un nuovo negozio di souvenir e un bar.

### SISTEMI TECNOLOGICI

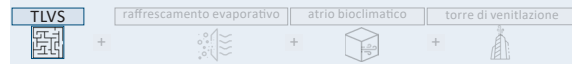
I lavori sono iniziati nel 2017 per scavare le fondamenta, che ospitano un labirinto di ventilazione poco profondo per raffreddare o riscaldare naturalmente lo spazio espositivo. L'aria di ventilazione si muove lentamente attraverso il lungo e tortuoso passaggio sotterraneo progettato per avere un'elevata capacità termica e un'ampia superficie. Il risultato è una naturale temperatura dell'aria prima che entri nella mostra attraverso griglie nel pavimento. In estate l'aria calda esterna si raffredda; in inverno l'aria fredda si riscalda. L'aria esce dalla stanza attraverso pannelli di ventilazione in bronzo sicuri integrati con le finestre panoramiche.

Benefici della tecnologia:

- Riduzione del consumo energetico, limitando l'uso di sistemi di climatizzazione attivi.
- Miglioramento del comfort interno grazie a una temperatura più stabile e a un'aria più fresca e salubre.
- Integrazione con altre soluzioni sostenibili, come il recupero delle acque e la ventilazione naturale.
- Sostenibilità ambientale, abbattendo le emissioni di CO<sub>2</sub> legate alla climatizzazione artificiale.

### DATI

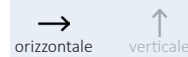
Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



Collocazione dei sistemi:



Sviluppo del sistema TLVS:



Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

Integrazione della tecnologia



Grado di durabilità



Prestazioni energetiche



Manutenzione



Risparmio fabbisogno energetico



Costo di messa in opera



Comfort indoor



Tempi di realizzazione

medio

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO

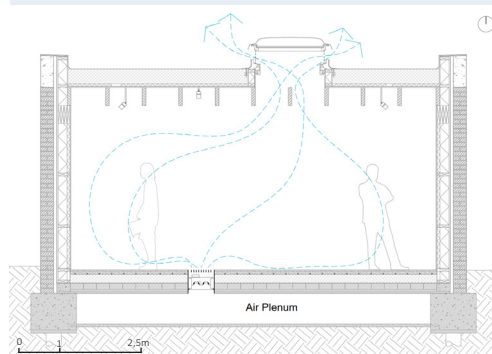


Fig.5 Sezione del sistema di ventilazione passiva basato su un plenum d'aria situato sotto il pavimento. L'aria fresca, pre-raffreddata attraverso un labirinto d'aria sotterraneo, viene distribuita uniformemente negli ambienti interni tramite griglie integrate nel pavimento. Il flusso d'aria segue un movimento convettivo naturale, garantendo una ventilazione efficiente e il raffreddamento dell'ambiente senza l'uso di sistemi di climatizzazione attivi. L'aria calda viene espulsa attraverso aperture superiori strategicamente posizionate, favorendo il ricambio d'aria e il comfort termico.



Fig.6 Pianta della configurazione del labirinto d'aria sotterraneo integrato con un plenum d'aria

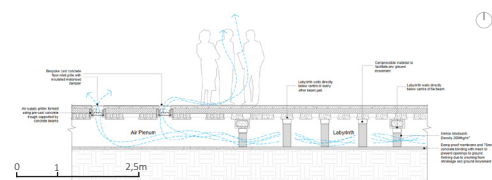
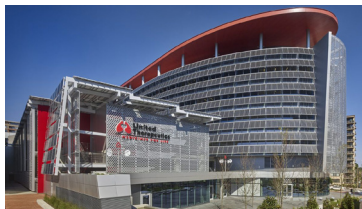


Fig.7 Dettaglio di sezione del sistema di ventilazione passiva



Fig.8 Rappresentazione del pavimento e delle pareti del percorso d'aria del labirinto:  
a.Solaio a travi e blocchi con percorso d'aria sottostante  
b.Percorso dell'aria sotto le travi  
c.Pareti divisorie in blocchi di cemento pesante deviano il percorso dell'aria  
d.Ispezione precoce del sito  
e.I muri di blocchi sfalsati formano il percorso dell'aria  
f.Trave e blocco con isolamento sopra  
g.Interfaccia parete e vuoto d'aria sottostante  
h. Presa d'aria in calcestruzzo  
i. Serranda motorizzata isolata all'interno del canale



*Figura 4.21 L'edificio rappresenta un esempio di progettazione urbana a energia netta zero (Net-Zero Energy), integrando facciate ad alte prestazioni, sistemi di schermatura solare dinamica e produzione energetica da fonti rinnovabili. Fonte: EwingCole, Pioneering Urban Net-Zero Energy Design.*



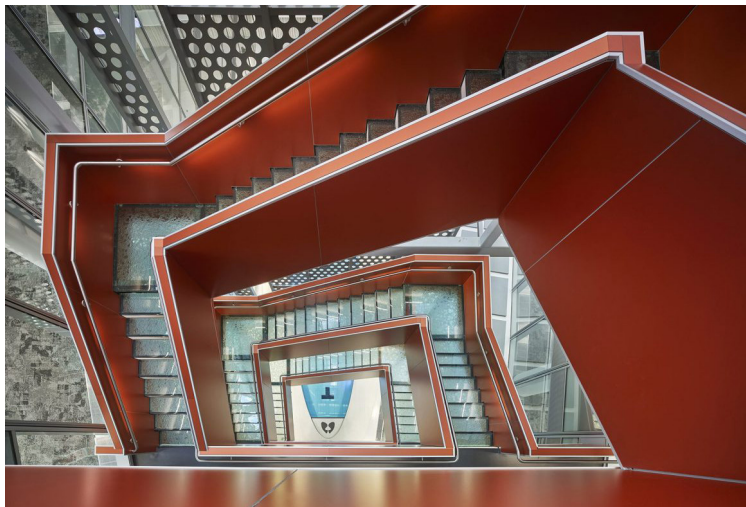
*Figura 4.22 Vista esterna dell'edificio Unisphere.  
Fonte: EwingCole + Atelier Ten, Unisphere, Silver Spring, Maryland, USA.*

### Caso studio 9: Unisphere, EwingCole + Atelier ten, Silver Spring, MD, Stati Uniti

L'Unisphere, progettato da EwingCole in collaborazione con Atelier Ten, è la sede centrale di United Therapeutics a Silver Spring, Maryland. Rappresenta uno dei più grandi edifici a energia netta zero al mondo, con una superficie complessiva di circa 20.000 m<sup>2</sup> distribuiti su sei piani. L'edificio è stato concepito come un laboratorio vivente di sostenibilità urbana, certificato LEED Platinum, capace di produrre e gestire in sito l'intero fabbisogno energetico annuale. L'edificio, completato nel 2018, si colloca in un contesto climatico caratterizzato da estati calde e umide e inverni freddi, condizioni che richiedono soluzioni integrate di controllo ambientale. La progettazione si fonda su un approccio olistico che combina efficienza energetica, strategie passive e produzione rinnovabile in sito.

#### Tecnologie e TLVS

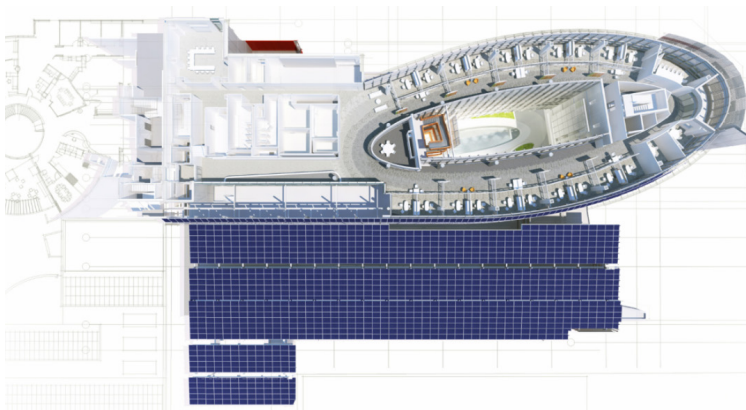
Il cuore della strategia ambientale dell'Unisphere è un sistema di ventilazione labirintica sotterranea in calcestruzzo, lungo circa 400 metri e situato a 3,7 metri di profondità, che pre-tratta l'aria di ventilazione sfruttando la massa del terreno per attenuarne le oscillazioni termiche stagionali e contribuisce a mantenere temperature stabili dell'aria di ventilazione, con guadagni/raffrescamenti medi di 2–4 °C a seconda della stagione. Integrato a questo, un sistema geotermico composto da 52 pozzi a 150 metri di profondità consente di accumulare e restituire calore, supportando sia il raffrescamento estivo sia il riscaldamento invernale. La copertura integra circa 3.000 pannelli fotovoltaici, in grado di produrre oltre 1.100 MWh/anno, mentre l'involucro ad alte prestazioni è caratterizzato da tripli vetri elettrocromatici, schermature dinamiche e un sistema di raccolta della luce naturale. Ulteriori strategie includono ventilazione mista con finestre apribili e atrio centrale a effetto camino, pool interno con funzione di pozzo termico, unità di recupero di calore con efficienza superiore all'80% e oltre 200 chilled beams alimentati da pompe di calore geotermiche. Grazie a questa e ad altre soluzioni, l'edificio riduce il consumo energetico complessivo del 55% rispetto a un edificio di riferimento ASHRAE 90.1. L'intero complesso è certificato LEED Platinum e copre il 100% del proprio fabbisogno energetico attraverso fonti rinnovabili on-site. L'edificio incorpora anche un sistema di riciclo delle acque piovane e grigie, riducendo del 40% il consumo idrico potabile.



*Figura 4.23* Vista della scala interna monumentale dell'edificio Unisphere. La scala, caratterizzata da superfici metalliche rosse e da un disegno dinamico dei percorsi verticali, costituisce un elemento centrale di connessione tra i livelli dell'edificio e favorisce la continuità visiva all'interno dell'atrio. Fonte: EwingCole + Atelier Ten, Unisphere, Silver Spring, Maryland, USA.

Rilevanza per la ricerca

Questo caso studio è significativo perché dimostra l'applicabilità del TLVS in un edificio di grandi dimensioni e a uso intensivo, dimostrando come il sistema possa integrarsi con soluzioni high-tech per raggiungere l'obiettivo net zero. Inoltre, fornisce un riferimento concreto sul ruolo del TLVS in climi continentali umidi, dove la gestione dei carichi latenti e sensibili è particolarmente critica. L'Unisphere rappresenta quindi un modello replicabile per edifici direzionali e complessi sanitari ad alte prestazioni, contribuendo a delineare il potenziale del TLVS come componente chiave della progettazione net zero.

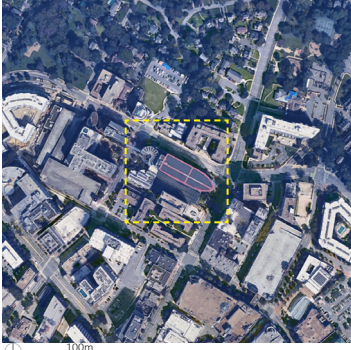


*Figura 4.24* Vista planimetrica dell'edificio con integrazione estensiva di impianti fotovoltaici in copertura, elemento chiave della strategia Net-Zero Energy. Fonte: EwingCole, Pioneering Urban Net-Zero Energy Design.



CS\_09 Unisphere

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
EwingCole + Atelier ten

**ANNO**  
2018

**LUOGO**  
Silver Spring, MD, Stati Uniti

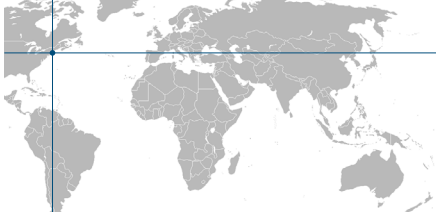
**AREA**  
210.000 mq

**COSTO**  
\$32,000,000

**DESTINAZIONE D'USO**  
Commerciale, Ufficio, Industriale, Lab. ricerca

**COM** **SCO** **UNI** **UFF** **OSP** **HUB** **CULT**

LOCALIZZAZIONE



**coordinate** 39°00'15"N 77°01'08"W

**altitudine** 104 m s.l.m.

**densità** 2.928,36 ab./km<sup>2</sup>

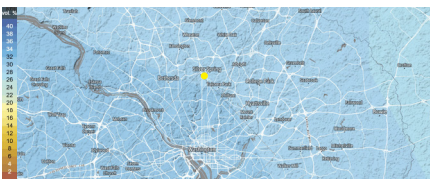
**zona climatica** Cfa\* (climi caldi e temperati)

\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

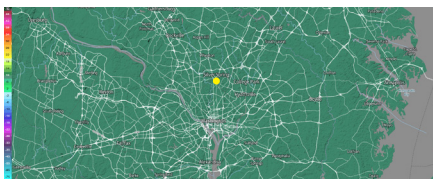
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



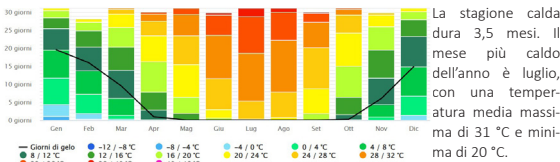
Nella città di Silver Spring, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 28% e il 30% vol. %.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



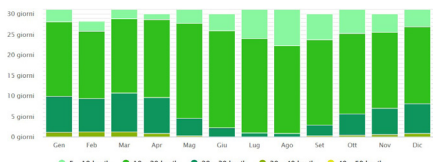
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Silver Spring sono tra i 12 e i 14°C.

Temperature massime



La stagione calda dura 3,5 mesi. Il mese più caldo dell'anno è luglio, con una temperatura media massima di 31 °C e minima di 20 °C.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 6,6 mesi, con velocità medie del vento di oltre 13,5 Km/h. Il giorno più ventoso dell'anno a Silver Spring è marzo, con una velocità oraria media del vento di 16,5 Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista della facciata frontale dell'edificio



Fig.2 Vista della facciata posteriore dell'edificio



Fig.3 Interno dell'edificio



Fig.4 Interno dell'edificio

**CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:**  
2019- Engineering News Record Best Green Project  
LEED Silver dall'US Green Building Council

**FONTI:**  
[https://www.architectmagazine.com/project-gallery/unisphere\\_o](https://www.architectmagazine.com/project-gallery/unisphere_o)  
<https://www.utunisphere.com/sustainability/>  
<https://qz.com/1771906/the-innovative-design-of-one-of-the-worlds-largest-net-zero-buildings>  
<https://www.atelierten.com/projects/unisphere/>

## CS\_09 Unisphere

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

United Therapeutics è un'azienda biotecnologica focalizzata sullo sviluppo e la commercializzazione di prodotti innovativi per rispondere alle esigenze mediche insoddisfatte dei pazienti con patologie croniche e pericolose per la vita. La nuova sede centrale è uno degli edifici commerciali a energia netta zero più grandi degli Stati Uniti.

### SISTEMI TECNOLOGICI

Le strategie impiegate per raggiungere lo stato di zero emissioni nette includono quanto segue:

- 3.000 pannelli solari o fotovoltaici sull'edificio che generano 1.175 MWH di energia ogni anno, sufficienti per alimentare 100 case.
- L'Earth Labyrinth è un labirinto di cemento lungo 402 m situato 3,6m sotto Unisphere. Utilizza la massa termica per moderare passivamente le temperature all'interno dell'atrio senza fare affidamento sul condizionamento meccanico. L'aria esterna viene aspirata attraverso una serie di passaggi in cemento interrati che immagazzinano energia termica di notte e moderano le oscillazioni di temperatura durante il giorno.
- Sotto Unisphere, 52 pozzi geo-scambio a doppio circuito e circuito chiuso sono perforati a 500 piedi nel terreno per fornire accumulo di energia.
- La piscina dell'atrio funge da fonte di raffreddamento evaporativo e viene utilizzata come dissipatore di calore.
- La raccolta della luce diurna consente di oscurare il sistema di illuminazione artificiale quando è disponibile una quantità adeguata di luce solare.
- Le finestre dell'area ufficio utilizzano la tecnologia del vetro elettrocromico che cambia il livello di tinta in base alla stagione, alla posizione del sole e alla copertura nuvolosa.
- Le finestre e i pannelli apribili consentono all'edificio di ventilare naturalmente fornendo una modalità di ventilazione completamente passiva tra determinate temperature.

L'energia in eccesso viene reinviata alla rete elettrica durante i periodi di picco della produzione e la rete elettrica fornisce questa energia di notte e nei periodi di bassa stagione.

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO



Fig.5 Rappresentazione grafica del funzionamento della ventilazione naturale: L'edificio è progettato per fornire ventilazione naturale nei periodi dell'anno in cui le condizioni dell'aria esterna lo consentono. La ventilazione naturale funzionerà in tre fasi: automatica, manuale e assistita meccanica.

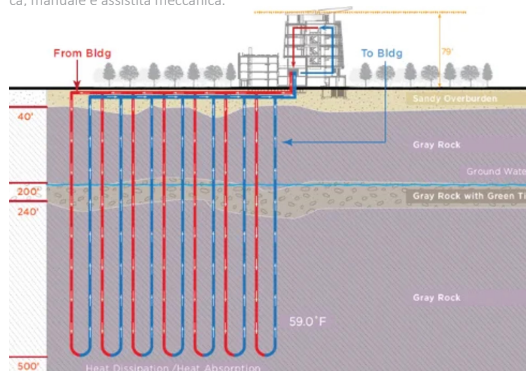
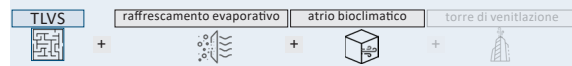


Fig.7 Rappresentazione grafica del funzionamento del sistema geotermico: Saranno utilizzati 52 pozzi geotermici perforati a più di 500 piedi nel terreno per aumentare l'efficienza del sistema di riscaldamento e raffreddamento tra il 25 e il 50%. Questo sistema fa circolare l'acqua calda o fredda (a seconda della stagione) utilizzata nel sistema HVAC attraverso i pozzi che fungono da scambiatori di calore con la terra.

### DATI

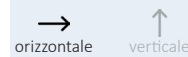
#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



#### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

##### Integrazione della tecnologia



##### Grado di durabilità



##### Prestazioni energetiche



##### Manutenzione



##### Risparmio fabbisogno energetico



##### Costo di messa in opera



##### Comfort indoor



##### Tempi di realizzazione

lunghi

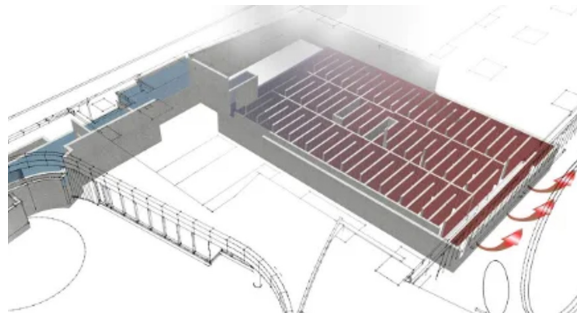


Fig.6 Rappresentazione grafica del funzionamento del TLVS: L'aria di aspirazione nell'atrio verrà convogliata attraverso un labirinto sotterraneo in cemento situato sotto il parcheggio per preriscaldare o preraffreddare l'aria. Il sistema funziona mettendo il flusso d'aria a contatto con la temperatura pressoché costante della terra. Mentre l'atrio non manterrà le stesse temperature interne delle aree completamente climatizzate dell'edificio, questa strategia migliorerà le condizioni dell'aria ambiente esterna.

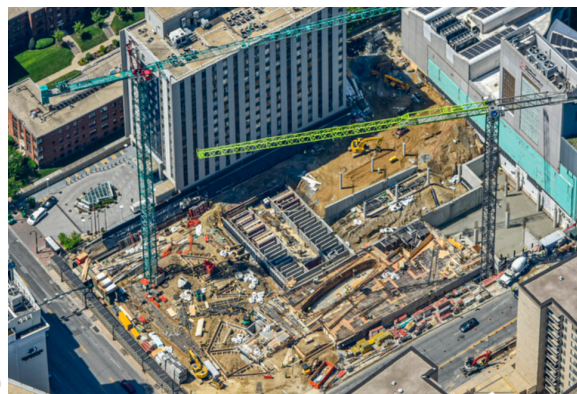


Fig.8 Vista a volo d'uccello della costruzione del TLVS

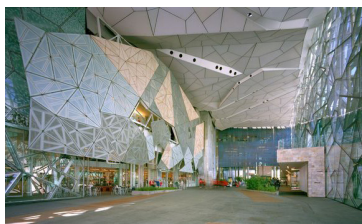




*Figura 4.25* Vista a volo d'uccello della Federation Square. Fonte: Media Architecture Biennale Awards, Federation Square.



*Figura 4.26* Vista esterna di uno dei volumi del complesso Federation Square. Fonte: LAB Architecture Studio + Bates Smart, Federation Square, Melbourne, Australia.



*Figura 4.27* Vista interna degli spazi pubblici del complesso. Fonte: LAB Architecture Studio + Bates Smart, Federation Square, Melbourne, Australia.

### Caso studio 10: Federation Square, Bates Smart e LAB Architecture Studio, Melbourne, Australia

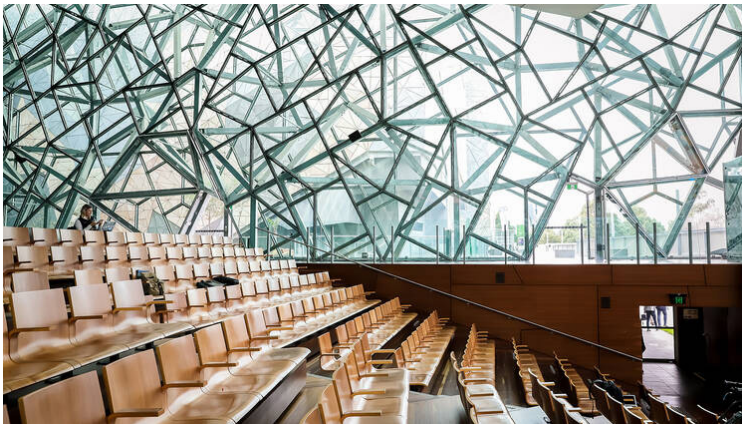
Federation Square è un grande complesso culturale e urbano situato nel centro di Melbourne, Australia, inaugurato nel 2002 come uno dei principali spazi pubblici della città. Il progetto è stato sviluppato dagli studi LAB Architecture Studio e Bates Smart, mentre la progettazione ambientale e impiantistica è stata curata da Atelier Ten. Il complesso si estende su un'area di circa 3,2 ettari e comprende musei, gallerie, spazi espositivi, cinema, ristoranti e piazze pubbliche. Uno degli elementi tecnici più innovativi del progetto è l'integrazione di un sistema di climatizzazione passiva basato su un labirinto termico sotterraneo in calcestruzzo, progettato per ridurre il fabbisogno energetico del complesso. Il sistema è stato realizzato sotto la piazza principale e costituisce uno dei più grandi esempi di thermal labyrinth ventilation system applicati a un complesso urbano su larga scala. Il labirinto si sviluppa per una lunghezza complessiva di circa 1,6 km di condotti sotterranei, realizzati in calcestruzzo ad alta massa termica. Questo sistema consente di sfruttare la temperatura relativamente stabile del terreno per il pre-condizionamento dell'aria destinata agli spazi interni degli edifici del complesso.

#### Tecnologie e TLVS

Sotto la piazza è realizzato uno dei più grandi labirinti termici al mondo: impronta circa 40×40 m, sviluppo lineare ~1,4 km di canali in calcestruzzo, superficie  $\approx 1.600 \text{ m}^2$ . L'aria notturna più fresca, spesso catturata dal microclima del fiume Yarra, viene fatta transitare nel labirinto per "caricare" di freddo la massa muraria; di giorno l'aria, ormai temperata, alimenta il raffrescamento a bassa velocità per displacement dell'Atrium e fornisce aria pre-raffreddata ai sistemi meccanici di altri corpi edilizi del complesso. In inverno il processo si inverte, con preriscaldamento dell'aria esterna. Le prestazioni dichiarate indicano fino a  $\sim 12^\circ\text{C}$  di raffreddamento estivo e  $\sim 7^\circ\text{C}$  di riscaldamento invernale sull'aria esterna, riducendo drasticamente i picchi di carico e la potenza di picco degli impianti. La geometria include numerosi cambi di direzione che promuovono la transizione a moti turbolenti locali e incrementano gli scambi convettivi parete-flusso; la rugosità e la grande superficie interna del calcestruzzo aumentano l'efficacia di scambio. Il sistema opera in sinergia con la strategia dell'involucro (controllo solare, selettività delle superfici vetrate) e con la distribuzione a pavimento dell'aria nell'Atrium.

#### Rilevanza per la ricerca

Federation Square costituisce il riferimento internazionale per il TLVS in spazi pubblici a grande inerzia e forte carico solare: dimostra la scalabilità del labirinto in climi con ampia escursione diurna e la replicabilità della soluzione come pre-trattamento per sistemi misti (naturali/assistiti). L'evidenza di temperature d'immissione significativamente ridotte, unita alla riduzione dei picchi di potenza e alla stabilizzazione termo-igrometrica dell'Atrium, fornisce indicatori quantitativi cruciali per calibrare modelli CFD/energetici e per trasferire il TLVS a contesti mediterranei con analoghi requisiti di comfort e uso intensivo.



*Figura 4.28 Federation Square, progetto di LAB Architecture Studio con Bates Smart, Melbourne (Australia). Vista interna dell'atrio principale. Fonte: ArchitectureAU, "Federation Square".*



*Figura 4.29 Sistema di labirinto termico in calcestruzzo (Thermal Labyrinth) in fase di realizzazione, costituito da setti paralleli ad alta massa termica che aumentano la superficie di scambio tra aria e struttura. Fonte: OCN – Online Construction Network.*



CS\_10 Federation Square

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
Bates Smart e LAB Architecture Studio  
**ANNO**  
2002  
**LUOGO**  
Melbourne, Australia  
**AREA**  
36.000 mq  
**COSTO**  
240 milioni di euro  
**DESTINAZIONE D'USO**  
Gallerie d'arte, spazi espositivi, cinema, sala per spettacoli, bar, ristoranti e spazi commerciali  
**COM** **SCO** **UNI** **UFF** **OSP** **HUB** **CULT**

LOCALIZZAZIONE

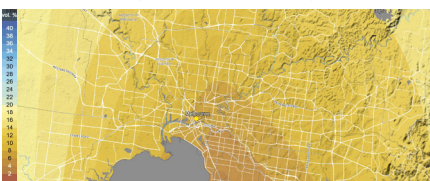


**coordinate** 37°48'49"S 144°57'47"E  
**altitudine** 31 m s.l.m.  
**densità** 516,28 ab./km²  
**zona climatica** Cfb\* (climi caldi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

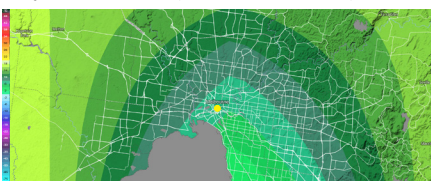
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



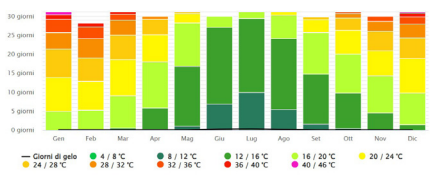
Nella città di Melbourne, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 6% e il 8vol.%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



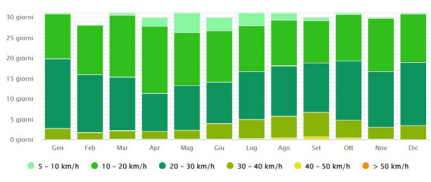
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Melbourne sono tra i 6 e i 8°C

Temperature massime



La stagione calda dura 3,0 mesi, con una T giornaliera max oltre 23 °C. Il mese più caldo dell'anno è febbraio, con una T media max di 25 °C e min di 14 °C

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 4,5 mesi, con velocità medie del vento di oltre 15,4 Km/h. Il giorno più ventoso dell'anno a Melbourne è agosto, con una velocità oraria media del vento di 16,5 Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO

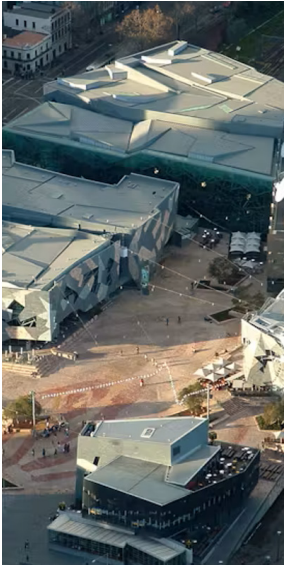


Fig.1 Vista dalla piazza centrale di fronte dell'edificio

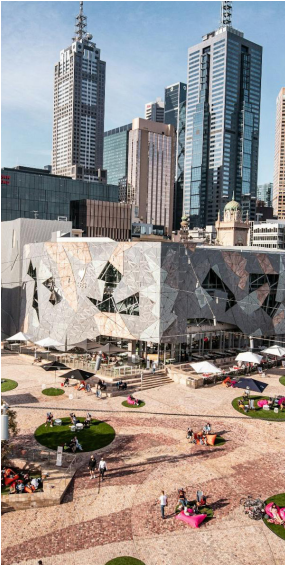


Fig.2 Vista della facciata e dell'atrio principale in funzione con il sistema del labirinto



Fig.3 Dettaglio della facciata esterna dell'edificio



Fig.4 Interno dell'edificio

**CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:**  
2003- IDAA Public/Institutional Interior Design Award  
2003- Australian Institute of Landscape Architects Award  
2003- Civic Trust Award\_ Public Domain Awards, Sustainability Award Winner  
2003- RAIA National and Victorian Chapter Awards

**FONTI:**  
<https://pzarch14.wordpress.com/2012/11/07/concrete-labyrinth-federation-square-australia/>  
<https://www.architectureanddesign.com.au/news/bpn/product-reviews/integrating-hvac-systems-in-design-maximizes-effic>  
<https://www.atelierten.com/projects/federation-square/>  
<https://theecolubrium.com/2023/07/01/critical-mass/>

## CS\_10 Federation Square

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Federation Square è un importante complesso dedicato ad arti e media a Melbourne, in Australia, progettato dallo studio di architettura atelier ten. Il progetto dell'edificio è stato fortemente incentrato sull'ambiente e sull'uso dell'energia, con il suo grande atrio vetrato progettato termicamente per eliminare il surriscaldamento senza utilizzare il raffreddamento. Lo schema include anche un impianto di cogenerazione centrale con refrigeratori ad assorbimento per una generazione efficiente di energia. L'impianto di riscaldamento e raffreddamento è situato lontano dagli edifici per semplificare la manutenzione.

### SISTEMI TECNOLOGICI

Il labirinto di 1.600 mq, lungo 1,4 km, di pareti in calcestruzzo ondulato superficiale è il componente principale del sistema di riscaldamento e raffreddamento passivo dell'edificio, che fornisce il controllo del clima ambientale per l'atrio vetrato della Piazza. La superficie ondulata delle pareti in calcestruzzo non solo consente un aumento della superficie del calcestruzzo, ma fornisce anche la struttura per la raccolta e l'immagazzinamento dell'energia, noto anche come Fabric Energy Storage (FES). FES utilizza la massa termica e le grandi proprietà di ritardo termico intrinseche del calcestruzzo per assorbire e immagazzinare energia. Durante le alte temperature estive, l'aria immessa nell'atrio è fino a 12 °C al di sotto della temperatura ambiente esterna e 7 °C di riscaldamento in inverno. In estate, il labirinto viene raffreddato dall'aria notturna proveniente dal fiume Yarra. L'aria viene fatta passare attraverso il labirinto, raffreddando le pareti ondulate in calcestruzzo prefabbricato alte 3 m alla temperatura notturna più bassa. Durante il giorno, l'aria ambiente calda viene ventilata nel labirinto e si raffredda quando entra in contatto con le pareti refrigerate. Quest'aria viene quindi distribuita nell'atrio. L'aria più calda nell'atrio viene spostata ed evacuata attraverso le prese d'aria nel soffitto. Il sistema di riscaldamento e raffreddamento di Federation Square include anche un impianto di cogenerazione centrale con refrigeratori ad assorbimento per una produzione di energia efficiente. L'impianto è situato lontano dagli edifici per semplificare la manutenzione.

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO



Fig.5 Pareti in cemento ondulato con superficie a zig-zag



Fig.6 Facciata esterna del sistema di filtrazione dell'aria del labirinto termico



Fig.7 Sistema di filtraggio dell'aria attraverso i cardboard filter prima dell'ingresso nel labirinto termico e dettaglio dell'elemento filtrante dell'aria

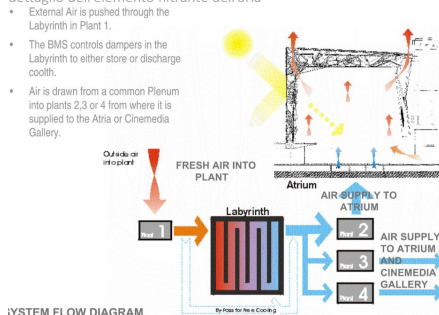


Fig.8 Grafico rappresentativo della strategia di ventilazione naturale passiva attraverso il fenomeno dello stack effect e dell'effetto camino all'interno di un ambiente vetrato con l'aiuto del labirinto d'aria termico

### DATI

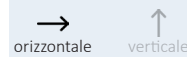
#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



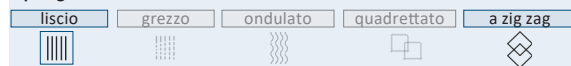
#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



#### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

##### Integrazione della tecnologia



##### Grado di durabilità



##### Prestazioni energetiche



##### Manutenzione



##### Risparmio fabbisogno energetico



##### Costo di messa in opera



##### Comfort indoor



##### Tempi di realizzazione

medio-lunghi

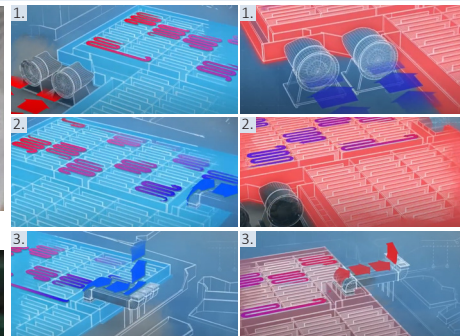


Fig.10 Funzionamento del labirinto d'aria in stagione estiva ed invernale step 1: INGRESSO DELL'ARIA ESTERNA. L'aria esterna, che può essere calda o fredda, viene aspirata. step 2: FILTRAGGIO. L'aria fresca proveniente dal fiume Yarra entra attraverso delle aperture, passando attraverso filtri di cartone che vengono cambiati ogni tre mesi. step 3: PASSAGGIO DELL'ARIA. L'aria calda o fredda attraversa il labirinto, dove subisce un graduale riscaldamento o raffreddamento. step 4: USCITA DELL'ARIA. L'aria, fresca/riscaldata, viene convogliata attraverso dei condotti che la dirigono all'interno dell'edificio.



Fig.9 tour del labirinto termale sotto Federation Square



Fig.11 Costruzione del labirinto d'aria termico





*Figura 4.30 Alpine House, Royal Botanic Gardens, Kew (UK). Serra bioclimatica caratterizzata da involucro leggero e sistema di ventilazione naturale assistita, progettata per il controllo microclimatico interno con ridotto impiego di energia meccanica.*

### Caso studio 11: Alpine House, Royal Botanic Gardens, Kew, Wilkinson Eyre Architects, Richmond, Regno Unito

La Davies Alpine House, progettata da Wilkinson Eyre Architects e inaugurata nel 2006 all'interno dei Kew Gardens di Londra, è una piccola serra dedicata alla coltivazione e all'esposizione di specie alpine. Il progetto nasce dall'esigenza di riprodurre, in un contesto britannico temperato, le condizioni microclimatiche tipiche delle regioni montane: elevata luminosità, aria fresca e costante ventilazione. L'edificio, collocato al centro del giardino roccioso e ricostruito attorno alla nuova struttura, è accessibile da Victoria Gate e dal cancello principale dei Kew Gardens. La serra è caratterizzata da un involucro quasi completamente vetrato, realizzato con 138 pannelli fissi e oltre 60 pannelli apribili in vetro stratificato e temperato a basso contenuto di ferro da 12 mm, capace di trasmettere fino al 90% della radiazione UV, fondamentale per la crescita delle piante alpine. La struttura è sostenuta da archi in acciaio inox e tiranti di piccolo diametro, che riducono al minimo le ombre e massimizzano la trasparenza. La geometria slanciata, esposta a est-ovest, garantisce la massima luce naturale in ogni stagione, mentre il fronte sud è ottimizzato per limitare il guadagno solare estivo.

#### Tecnologie e TLVS

Il cuore della strategia ambientale è rappresentato da un labirinto termico in calcestruzzo, concepito come dissipatore di calore e volano termico. Sotto la struttura è stato realizzato un tunnel di circa 3 metri di profondità e 80 metri di sviluppo lineare, interamente in blocchi di calcestruzzo, connesso a un sistema di ventilazione forzata. Durante la notte, l'aria fresca viene immessa nel labirinto per raffreddare la massa cementizia, che accumula il freddo e lo rilascia nelle ore più calde del giorno. Le bocchette interne distribuiscono l'aria lungo il perimetro della serra, orientandola direttamente sulle foglie delle piante per riprodurre la ventilazione tipica degli habitat alpini. L'involucro vetrato è costituito da 138 pannelli fissi, 61 pannelli di base e 12 porte o elementi laterali, realizzati in vetro stratificato e temperato a basso contenuto di ferro da 12 mm, capace di garantire una trasmissione della radiazione ultravioletta prossima al 90%. Per minimizzare le perdite di trasparenza luminosa, sono stati impiegati giunti in silicone, che riducono l'abbattimento della trasmissione al 1,5%, un valore sensibilmente inferiore rispetto al 5% tipico dei montanti tradizionali. La struttura di sostegno è realizzata in acciaio inox con tiranti di diametro variabile tra 16 e 24

mm, assicurando resistenza, leggerezza e continuità visiva all'interno della serra. Un sistema di archi gemelli ("twin arches") che, oltre a garantire la trasparenza architettonica, favoriscono un efficace stack effect, espellendo l'aria calda verso l'alto. L'orientamento allungato est-ovest e la sezione sottile esposta a nord e sud riducono al minimo i guadagni solari estivi e massimizzano la luce naturale in tutte le stagioni.

Rilevanza per la ricerca

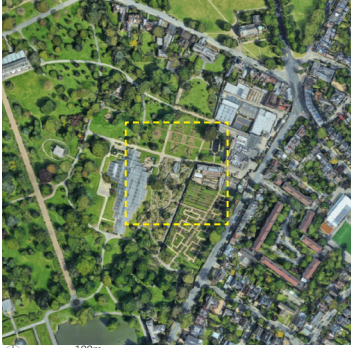
L'Alpine House rappresenta un caso emblematico di applicazione del TLVS in un edificio di piccole dimensioni, dimostrando come il sistema possa essere adattato non solo a grandi spazi pubblici ma anche a serre e ambienti specializzati. La sperimentazione evidenzia la capacità del labirinto di creare un microclima controllato in un contesto climatico non alpino, con implicazioni significative per la conservazione botanica e per l'architettura bioclimatica di nicchia. Pur rimanendo un caso unico e difficilmente replicabile su larga scala, fornisce spunti preziosi per comprendere l'interazione tra massa termica, ventilazione mirata e requisiti specifici di comfort, ampliando lo spettro applicativo del TLVS verso ambiti non convenzionali.



*Figura 4.31 Percorso in muratura lapidea ad elevata massa termica, integrato nel sistema di ventilazione naturale per il raffreddamento passivo dell'aria attraverso scambio termico con superfici minerali. Fonte: Architettura e ventilazione passiva – immagini di progetto (web). Fonte: Royal Botanic Gardens, Kew.*

CS\_11 Alpine House, Royal Botanic Gardens, Kew

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
Wilkinson Eyre Architects  
**ANNO**  
2005  
**LUOGO**  
Richmond, Regno Unito  
**AREA**  
36.000 mq  
**COSTO**  
£800.000  
**DESTINAZIONE D'USO**  
Giardino botanico



LOCALIZZAZIONE

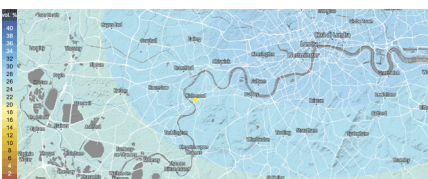


**coordinate** 51°26'52"N 0°19'27"W  
**altitudine** 463 m s.l.m.  
**densità** 3.017 ab./km²  
**zona climatica** Cfb\* (climi caldi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

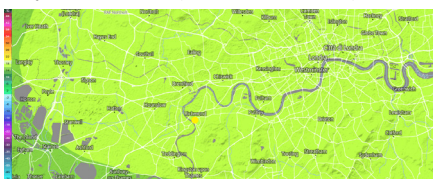
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



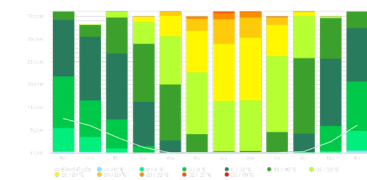
Nella città di Richmond, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 26% e il 28%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



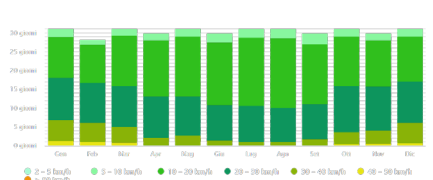
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Richmond sono tra i 16 e 18°C

Temperature massime



Il mese che registra le temperature più elevate durante l'anno è chiamato Luglio, dove prevale una T media di 17.8 °C.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 4,5 mesi, con velocità medie del vento di oltre 15,4 Km/h. Il giorno più ventoso dell'anno a Melbourne è agosto, con una velocità oraria media del vento di 16,5 Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista centrale del giardino botanico



Fig.2 Ingresso alla struttura

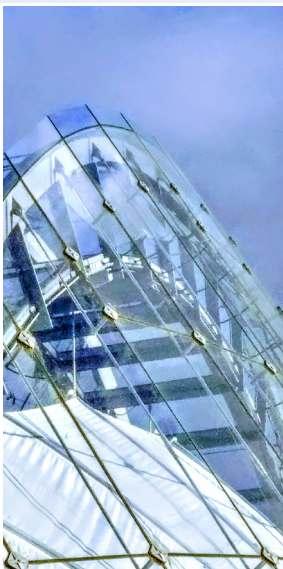


Fig.3 Dettaglio degli elementi di vetro e acciaio della facciata del giardino botanico



Fig.4 Interno del giardino botanico

CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:

2008- Premio Civic Trust  
2007- Premio RIBA Stephen Lawrence- Premio Mies van der Rohe  
2006- Premio IStructE-Design Week Award (categoria Menzione/Musei e Gallerie)

FONTI:

<https://www.kew.org/kew-gardens/whats-in-the-gardens/davies-alpine-house>  
<https://daviesalpinehouse.weebly.com/environment.html>  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-8748.2007.00563.x>  
<https://www.building.co.uk/the-project/3066282/article>



## CS\_11 Alpine House, Royal Botanic Gardens, Kew

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Realizzata quasi interamente in vetro, la Casa Alpina è stata costruita utilizzando le tecnologie più all'avanguardia dell'epoca. La struttura non danneggia né inquina l'ambiente. Con le sue forme morbide, la costruzione appare quasi organica e si inserisce armoniosamente nei Giardini.

### SISTEMI TECNOLOGICI

A 3 metri sotto l'Alpine House si trova un doppio labirinto di lastre di cemento realizzato con blocchi standard da 3,5 n, progettato da Atelier ten, un gruppo di ingegneria ambientale, e costruito da Kilby e Gayford. Il processo imita il sistema naturale dei termitai e funziona come il contrario di un ipocausto romano. L'aria esterna viene aspirata nell'intricato tunnel lungo 80 metri. Si tratta di un sistema di raffreddamento passivo. Il labirinto si raffredda durante la notte grazie alle proprietà di massa termica del cemento, che a sua volta raffredda l'aria che entra lentamente. Quattro ventilatori a basso consumo energetico spostano delicatamente l'aria all'interno dell'edificio attraverso tubi di spostamento che entrano nella serra a livello delle piante. Il movimento dell'aria è specificamente progettato per essere diretto e controllato sulle piante tramite passaggi posizionati separatamente grazie ai tubi. Questo flusso d'aria può essere limitato o favorito e rimane completamente controllabile, rendendolo un sistema molto flessibile. Questo non solo aiuta a mantenere un ambiente fresco in cui le piante possano prosperare, ma fornisce anche un'azione costante del vento che mantiene le piante asciutte, un requisito importante per le piante alpine. Il resto della ventilazione dell'edificio è ingegnosamente studiato. Il punto più alto della struttura è di 10 metri e questa altezza consente il funzionamento di un meccanismo di effetto camino e incrocio. L'aria fresca viene immessa nello spazio dal labirinto. Viene aspirata attraverso le griglie est e ovest lungo la base di 16 m e attraverso i due ingressi nord e sud che sono tenuti costantemente aperti durante l'orario di visita. L'aria fresca fa salire l'aria più calda e la sostituisce, assicurando che le piante non si surriscaldino. Ci sono prese d'aria collegate a entrambi i lati dell'arco del tetto, controllate da termostati, il che significa che l'aria calda che sale può fuoriuscire permettendo all'aria fresca di riempire lo spazio. Questo design consente il continuo ricambio di aria fresca all'interno della serra.

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO



Fig.5 Struttura a forma organica, articolata in elementi metallici e vetriati

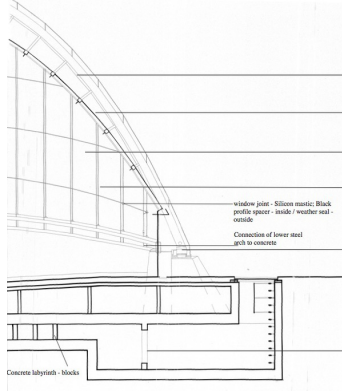


Fig.6 Sezione architettonica che mostra un volume coperto da una struttura curva e uno spazio sottostante con cavità interrata

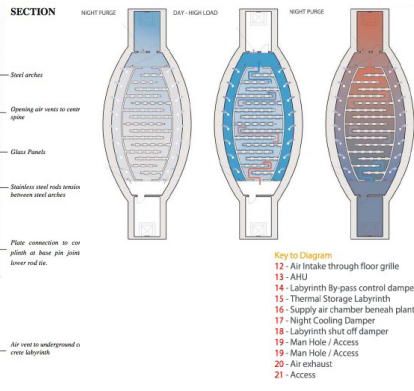


Fig.7 Il progetto generale per i sistemi di raffreddamento doppio della Davies Alpine House: diagrammi schematici che rappresentano il comportamento dell'aria all'interno di un volume chiuso, con percorsi differenziati

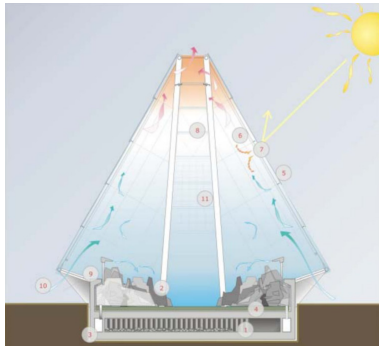


Fig.8 Sezione schematica di un edificio con indicazione dei flussi d'aria e dell'interazione tra ambiente interno ed esterno in presenza di irraggiamento solare

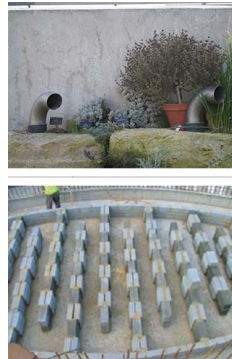
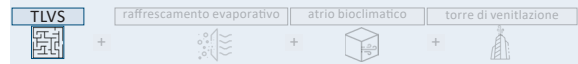


Fig.9 Vista di cantiere di una struttura interrata in costruzione, con pareti in calcestruzzo e setti disposti in sequenza per formare un sistema articolato di percorsi



### DATI

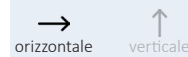
#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

#### Integrazione della tecnologia



#### Grado di durabilità



#### Prestazioni energetiche



#### Manutenzione



#### Risparmio fabbisogno energetico



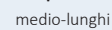
#### Costo di messa in opera



#### Comfort indoor



#### Tempi di realizzazione





*Figura 4.32* Vista della facciata nord dell'edificio. Fonte: Inhabitat, Surry Hills Library: Australia's new standard of sustainable excellence.

### Caso studio 12: Surry Hills Library and Community Centre, FJMT, Sydney, Australia

La Surry Hills Library and Community Centre, progettata dallo studio FJMT (Francis-Jones Morehen Thorp), è stata completata nel 2009. Si trova in Crown Street, nel quartiere di Surry Hills, Sydney. L'edificio è di circa 2.497 m<sup>2</sup>, su un sito compatto (25×28 m), ed è pensato come struttura mista: biblioteca, centro comunitario, asilo per l'infanzia, sale di attività e spazi pubblici. L'edificio agisce come punto di incontro per la comunità, con una forte integrazione urbana e sensibilità alla trasparenza, declinata tramite facciate in vetro, pannelli mobili in legno, e un atrio vetrato.

*Figura 4.33* Surry Hills Library and Community Centre, Sydney (Australia), edificio pubblico caratterizzato da involucro ad alte prestazioni con schermature verticali e integrazione di strategie passive. Fonte: Inhabitat, Surry Hills Library: Australia's new standard of sustainable excellence.

#### Tecnologie e TLVS

Tra le strategie ambientali adottate, figura un labirinto termico associato a elementi di filtraggio passivo (bio-filtri vegetali), un atrio vetrato che funge da buffer termico, ventilazione ibrida (naturale + assistita), e l'uso di perforazioni / sistemi di ombreggiamento automatici (timber louvers) per controllare l'irraggiamento solare. L'aria viene aspirata dalla sommità dell'atrio, filtrata mediante piante, poi passa sotto l'edificio dove è "temperata" da una serie di "rock baskets" ad alta massa termica, che costituiscono il labirinto, prima di raggiungere gli spazi interni. C'è anche uso di pompe geotermiche





*Figura 4.34 Surry Hills Library and Community Centre, dettaglio dello spazio interno con copertura vetrata e sistema di ventilazione naturale zenitale, progettato per favorire l'illuminazione diffusa e il controllo termo-ambientale passivo degli ambienti collettivi. Fonte: Inhabitat, Surry Hills Library: Australia's new standard of sustainable excellence.*

(boreholes) per pre-raffreddamento o preriscaldamento; sistema automatizzato di gestione (BMS) regola aperture, ombreggiature, ventilazione e illuminazione artificiale. È dichiarato che il raffreddamento passivo + labirinto + ventilazione naturale porta a riduzioni fino al 50% della necessità di raffreddamento artificiale. Ulteriori strategie includono un tetto verde, raccolta delle acque piovane, materiali sostenibili, finiture a basso VOC. Il labirinto contribuisce a una riduzione fino al 50% del fabbisogno di raffrescamento meccanico rispetto a edifici analoghi privi di strategie passive. L'utilizzo combinato di bio-filtri, massa termica e ventilazione naturale permette di garantire condizioni di comfort indoor anche nelle giornate estive più calde, limitando l'attivazione degli impianti di climatizzazione tradizionali.

#### Rilevanza per la ricerca

Questo caso è particolarmente prezioso perché fornisce un esempio concreto di TLVS in un edificio pubblico di medie dimensioni, con uso misto e forte interazione sociale. Le strategie passive combinate (labirinto, filtrazione vegetale, atrio buffer, ventilazione mista) offrono dati utili per comparazioni sulle prestazioni in climi subtropicali / temperati umidi, come può essere il Mediterraneo estivo. Inoltre, l'integrazione del sistema di labirinto con il BMS e i sistemi di shading/doppia-facciata rende questo progetto un benchmark per studiare l'ottimizzazione tra comfort, efficienza energetica, e flessibilità operativa.



*Figura 4.35 Vista della facciata nord-est dell'edificio. Fonte: Inhabitat, Surry Hills Library: Australia's new standard of sustainable excellence.*



CS\_12 Surry Hills Library and Community Centre

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
FJMT  
**ANNO**  
2009  
**LUOGO**  
Sydney, Australia  
**AREA**  
2497 m<sup>2</sup>  
**COSTO**  
Confidenziale  
**DESTINAZIONE D'USO**  
Architettura ad uso misto, Biblioteca, Centro comunitario  
**COM** **SCO** **UNI** **UFF** **OSP** **HUB** **CULT**

LOCALIZZAZIONE

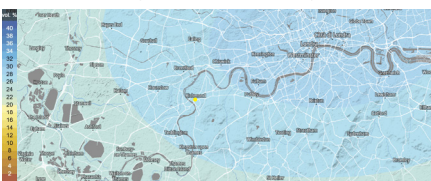


**coordinate** 33°52'04"S 151°12'26"E  
**altitudine** 6 m s.l.m.  
**densità** 449,33 ab./km<sup>2</sup>  
**zona climatica** Cfb\* (climi caldi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

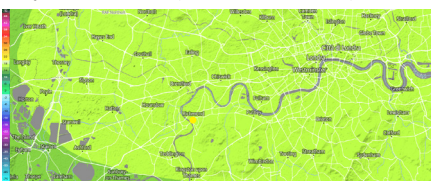
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



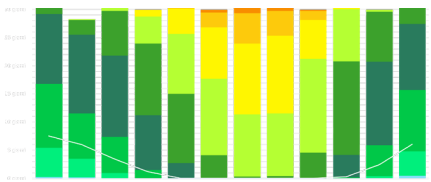
Nella città di Sydney, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 8% e il 10%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



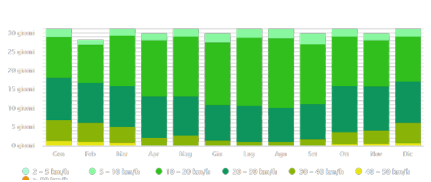
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo della città di Sydney sono tra i 14 e i 16°C

Temperature massime



Il mese di temperatura più alta è luglio, durante il quale la temperatura media raggiunge fino a 22.8 °C. A 12.7 °C in media, Luglio è il mese più caldo dell'anno.

Velocità del vento



Il periodo più ventoso dell'anno dura 4,5 mesi, con velocità medie del vento di oltre 15,4 Km/h. Il giorno più ventoso dell'anno a Melbourne è agosto, con una velocità oraria media del vento di 16,5 Km/h.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista dalla facciata dell'edificio



Fig.2 Vista della facciata d'ingresso all'edificio



Fig.3 Dettaglio della facciata esterna



Fig.4 Interno dell'edificio

**CERTIFICAZIONI ENERGETICHE/AMBIENTALI/SOCIALI:**  
2008- Premio Civic Trust  
2007- Premio RIBA Stephen Lawrence- Premio Mies van der Rohe  
2006- Premio IStructE-Design Week Award (categoria Menzione/Musei e Gallerie)

**FONTI:**  
<https://www.atelierten.com/projects/alpine-house/>  
<https://daviesalpinehouse.weebly.com>

## CS\_12 Surry Hills Library and Community Centre

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Questo progetto è situato in posizione privilegiata nel cuore di Surry Hills, un sobborgo di Sydney, la cui comunità è caratterizzata da una diversità di età, reddito e background culturali. Il brief del progetto è stato sviluppato in stretta consultazione con la comunità locale, molto attiva. L'approccio chiave emerso da queste discussioni è stato che la comunità desiderava una struttura che tutti potessero condividere. Piuttosto che una semplice biblioteca, un centro comunitario o un asilo nido, è diventato chiaro che era importante avere tutte queste strutture insieme in un unico edificio, in un unico luogo. In questo modo, l'edificio è diventato un luogo veramente condiviso, dove l'intera comunità poteva incontrarsi e utilizzarlo in modi diversi.

### SISTEMI TECNOLOGICI

La serie di iniziative ambientali intrinseche al progetto comprende anche un labirinto termico per il filtraggio passivo e la temperatura dell'aria, sistemi di persiane in legno a inseguimento solare, sistemi di ombreggiamento automatizzati in tessuto, ventilazione a modalità mista, un ampio impianto fotovoltaico, fori di raffreddamento geotermico, un tetto verde, raccolta e riciclo dell'acqua piovana e selezione di materiali sostenibili.

I sistemi computerizzati di gestione e controllo degli edifici (BMS) monitorano e controllano automaticamente le condizioni ambientali interne dell'edificio, regolando la ventilazione e le lamelle parasole durante il giorno per controllare il carico termico, la luce e l'ombra, e accendendo e spegnendo le luci quando necessario. Il BMS monitora e registra anche i sistemi elettrici e idraulici per massimizzare l'efficienza ambientale dell'edificio e identificare eventuali guasti.

Il centro è stato accolto con entusiasmo dalla comunità locale fin dalla sua apertura. È un luogo accogliente per tutte le età e tutti i gruppi sociali. Offre strutture che incarnano i valori di equità nell'accesso alle informazioni e alle risorse, essenziali per la costruzione di comunità.

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO

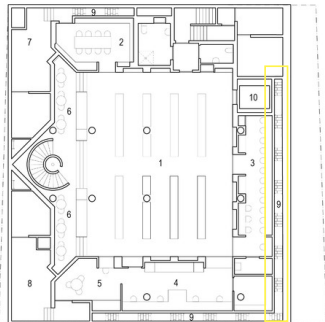


Fig.5 Pianta dell'edificio

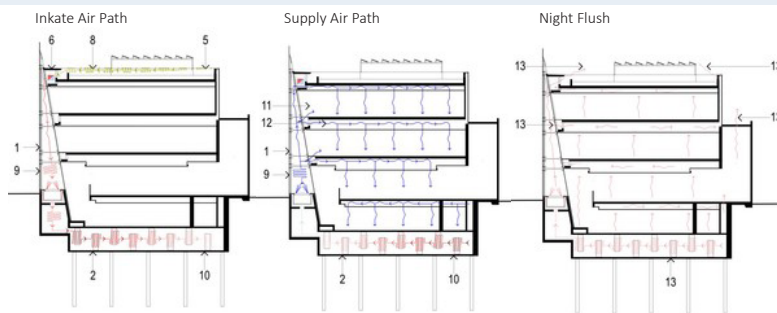


Fig.6 Sezioni del TLVS con evidenza delle tre fasi: ingresso dell'aria, percorso di mandata e scarico notturno.



Fig.7 Sezione esplicativa del funzionamento dei sistemi tecnologici presenti nell'edificio

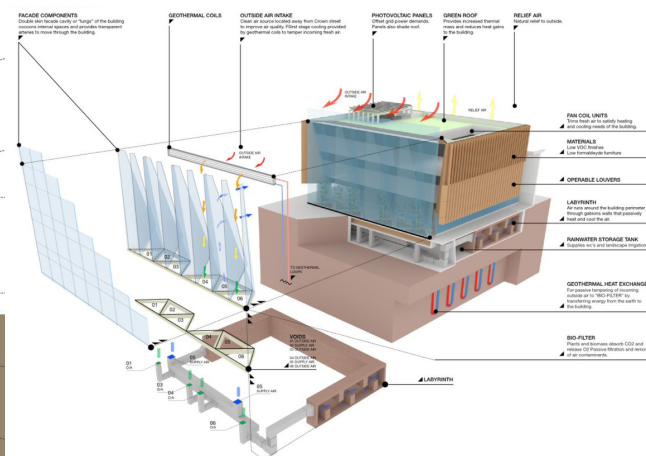


Fig.8 Esploso assonometrico della struttura dell'edificio con particolare attenzione al posizionamento del TLVS

### DATI

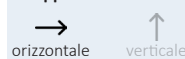
#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



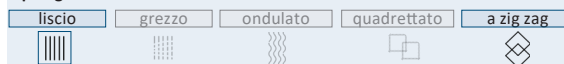
#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

#### Integrazione della tecnologia



#### Prestazioni energetiche



#### Risparmio fabbisogno energetico



#### Comfort indoor



#### Grado di durabilità



#### Manutenzione



#### Costo di messa in opera



#### Tempi di realizzazione

medio-lunghi



*Figura 4.36* Vista esterna dell'edificio Energy Academy Europe, Groningen, Paesi Bassi. Fonte: Broekbakema + De Unie Architecten.



*Figura 4.37* Vista prospettica dell'edificio Energy Academy Europe. Fonte: Broekbakema + De Unie Architecten.



*Figura 4.38* Vista degli spazi interni dell'edificio Energy Academy Europe. Fonte: Broekbakema + De Unie Architecten.

### Caso studio 13 Energy Academy Europe, Broekbakema + De Unie Architecten, Groningen, Paesi Bassi

L'Energy Academy Europe (EAE) è un edificio di ricerca e formazione dedicato alle tecnologie energetiche sostenibili, situato nel Zernike Campus di Groningen, nei Paesi Bassi. Il progetto è stato realizzato dagli studi Broekbakema e De Unie Architecten, con completamento nel 2016, come centro interdisciplinare della University of Groningen e della Hanze University of Applied Sciences. L'edificio ha una superficie di circa 14.800 m<sup>2</sup> ed è concepito come un hub per ricerca, didattica e collaborazione tra università, istituzioni e industria nel campo della transizione energetica.

Dal punto di vista architettonico, l'edificio è caratterizzato da una volumetria compatta con una grande facciata vetrata e un atrio centrale che favorisce la distribuzione della luce naturale e la comunicazione visiva tra i diversi livelli. L'involucro utilizza elementi in legno e vetro ad alte prestazioni, combinati con schermature solari e sistemi di ventilazione integrati, mentre la copertura ospita una struttura tridimensionale con circa 133 pannelli fotovoltaici. Il progetto è stato sviluppato con un approccio altamente integrato alla sostenibilità e ha ottenuto la certificazione BREEAM Outstanding, una delle più alte valutazioni europee per edifici sostenibili.

#### Tecnologie e TLVS

L'edificio integra un insieme articolato di strategie passive e sistemi energetici avanzati finalizzati alla riduzione dei consumi e alla produzione locale di energia. Tra le principali strategie figurano: Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) situato nel piano interrato dell'edificio ventilazione ibrida (naturale e meccanica) gestita tramite sistemi automatizzati attivazione della massa termica dell'edificio mediante sistemi radianti integrati nelle solette in calcestruzzo sistemi geotermici di accumulo stagionale di energia (TES) facciate altamente isolate con schermature solari in legno produzione di energia rinnovabile tramite impianto fotovoltaico raccolta e riuso delle acque meteoriche

Il labirinto termico rappresenta uno dei sistemi passivi più significativi dell'edificio. È costituito da un sistema di condotti in calcestruzzo collocati nel basamento dell'edificio, con una lunghezza complessiva di circa 200 m, attraverso i quali viene convogliata l'aria esterna prima di essere immessa negli ambienti interni. Duran-

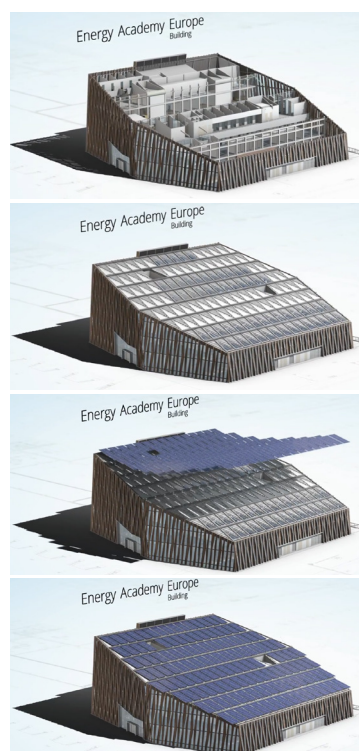


te il passaggio nel labirinto l'aria scambia calore con la massa del terreno e con le superfici in calcestruzzo, sfruttando la temperatura relativamente stabile del sottosuolo per pre-raffreddare l'aria in estate e pre-riscaldarla in inverno.

Questo processo consente di ridurre il carico sui sistemi HVAC tradizionali, migliorando l'efficienza energetica complessiva dell'edificio. L'aria preconditionata dal labirinto viene successivamente distribuita negli ambienti tramite il sistema di ventilazione controllata e integrata con i sistemi di climatizzazione radianti. L'intero funzionamento dell'edificio è monitorato e ottimizzato tramite un Building Management System (BMS) che regola ventilazione, produzione energetica e strategie di controllo climatico.

#### Rilevanza per la ricerca

L'Energy Academy Europe rappresenta un caso studio particolarmente rilevante per la ricerca sui Thermal Labyrinth Ventilation Systems (TLVS) e sulle strategie di climatizzazione passiva in edifici contemporanei di grandi dimensioni. Il progetto dimostra come l'integrazione tra massa termica, ventilazione naturale controllata, sistemi geotermici e produzione rinnovabile possa contribuire in modo significativo alla riduzione del fabbisogno energetico negli edifici universitari e di ricerca. L'edificio costituisce un laboratorio vivente per lo studio delle prestazioni energetiche in condizioni reali, grazie alla presenza di sistemi di monitoraggio che permettono di analizzare il comportamento dei diversi sottosistemi ambientali. La combinazione tra labirinto termico, sistemi radianti e gestione intelligente dell'energia rende questo progetto un benchmark europeo per l'analisi delle strategie di ventilazione passiva in climi temperati freddi, offrendo importanti riferimenti per applicazioni analoghe in contesti climatici comparabili.



*Figura 4.39 Sequenza assonometrica del modello digitale dell'Energy Academy Europe che illustra la configurazione dell'edificio e la stratificazione dei principali sistemi tecnologici, evidenziando la struttura interna, il sistema di copertura e l'integrazione dei pannelli fotovoltaici nella superficie del tetto. Fonte: Broekbakema + De Unie Architecten.*

CS\_13 Energy Academy Europe

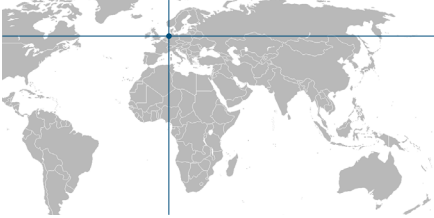
DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
Broekbakema + De Unie Architecten  
**ANNO**  
2016  
**LUOGO**  
Groningen, Paesi Bassi  
**AREA**  
≈ 4 350 m<sup>2</sup>  
**COSTO**  
≈ 25 milioni di euro  
**DESTINAZIONE D'USO**  
ricerca, istruzione universitaria, uffici e laboratori nel settore energetico



LOCALIZZAZIONE

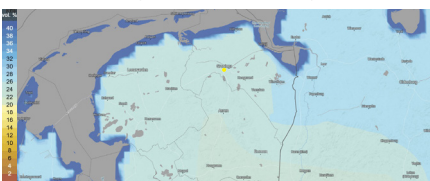


**coordinate** 53.22° N 6.56° E  
**altitudine** 4 m s.l.m.  
**densità** 2.845,58 ab./km<sup>2</sup>  
**zona climatica** Cfb\* (climi caldi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

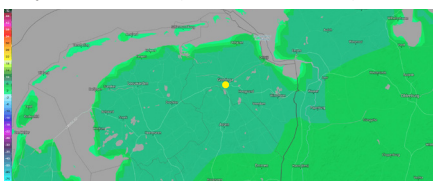
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



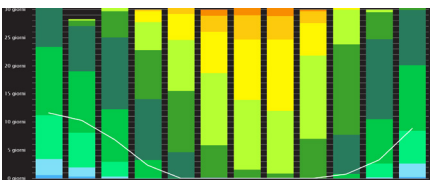
Nella città di Groningen, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 24% e il 26%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



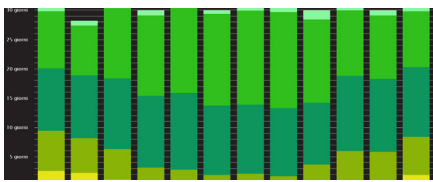
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo della città di Groningen sono tra i 6 e i 8°C.

Temperature massime



Il mese più caldo dell'anno è Luglio, con una temperatura media di 17.8°C. In Gennaio, la T media è 3.0°C. È la T media più bassa dell'intero anno.

Velocità del vento



Il vento soffia per la maggior parte dei giorni dell'anno con velocità moderata tra 10 e 30 km/h, con più episodi di vento forte (30-40 km/h) nei mesi invernali, mentre le velocità oltre 40 km/h sono rare.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista esterna della facciata sud-ovest dell'edificio.



Fig.2 Vista esterna della facciata nord dell'edificio.



Fig.3 Interno dell'edificio: Hall principale



Fig.4 Interno dell'edificio: Winter garden

PREMI/CERTIFICAZIONI:

2017 - International BREEAM Awards (BREEAM Outstanding con un punteggio di circa 89,6 %)  
2017 - Innovation Award – Uneto-VNI  
2017 - Most Beautiful New Building of Groningen

FONTI:

[https://www.rug.nl/groundbreakingwork/projects/eae/logbook\\_eae?lang=en](https://www.rug.nl/groundbreakingwork/projects/eae/logbook_eae?lang=en) [https://www.archdaily.com/891205/energy-academy-europe-broekbakema-plus-de-unie-architecten?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/891205/energy-academy-europe-broekbakema-plus-de-unie-architecten?ad_medium=gallery) <https://www.rug.nl/society-business/energy/collaboration/energy-academy-europe-magazine-rug-en.pdf> <https://www.youtube.com/watch?v=78uofZUq2Og>

## CS\_13 Energy Academy Europe

### SISTEMI TECNOLOGICI

**Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS):** è un condotto sotterraneo in calcestruzzo lungo circa 200 m, situato nel piano interrato dell'edificio, attraverso il quale l'aria esterna viene fatta scorrere lentamente (velocità <1 m/s) prima di entrare negli ambienti interni.

**Solar chimney:** è un camino verticale situato sul punto più alto dell'edificio che sfrutta il principio dell'effetto camino (stack effect).

**Winter garden (buffer climatico):** è uno spazio vetrato collocato sul lato sud dell'edificio che funziona come zona tampone termica tra interno ed esterno.

**Ventilazione naturale ibrida:** sfruttando vento, differenze di temperatura e tiraggio del solar chimney per muovere l'aria quando le condizioni climatiche lo permettono, riducendo così il funzionamento degli impianti HVAC.

**Concrete Core Activation (CCA):** prevede tubazioni integrate nelle solette strutturali attraverso cui circola acqua calda o fredda; la massa termica del calcestruzzo accumula e rilascia lentamente energia termica, consentendo una climatizzazione a bassa temperatura e con elevata inerzia termica.

**Geothermal Thermal Energy Storage (TES):** utilizza pozzi nel sottosuolo per immagazzinare energia termica stagionale, permettendo di conservare il calore in estate e il freddo in inverno e di riutilizzarlo per il riscaldamento e il raffreddamento dell'edificio.

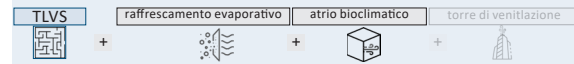
**Copertura fotovoltaica tridimensionale:** La copertura dell'edificio integra una struttura tridimensionale con circa 133 pannelli fotovoltaici, progettata per massimizzare la produzione energetica e allo stesso tempo consentire l'ingresso della luce naturale negli spazi interni.

**Sistema di raccolta dell'acqua piovana:** viene immagazzinata e utilizzata per funzioni non potabili come l'irrigazione delle aree verdi e lo scarico dei servizi igienici.

**Involucro edilizio ad alte prestazioni:** facciate altamente isolate e schermature solari in legno, che riducono le dispersioni termiche in inverno e limitano il surriscaldamento estivo, migliorando l'efficienza energetica complessiva dell'edificio.

### DATI

Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



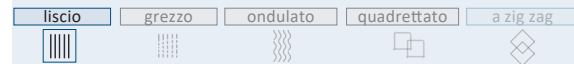
Collocazione dei sistemi:



Sviluppo del sistema TLVS:



Tipologia del sistema TLVS:



### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

Integrazione della tecnologia



Grado di durabilità



Prestazioni energetiche



Manutenzione



Risparmio fabbisogno energetico



Tempi di realizzazione



Comfort indoor



Costo di messa in opera



### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO

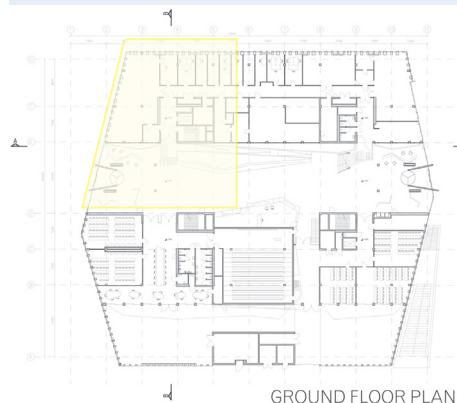


Fig.5 Piano piano terra dell'edificio evidenziando il posizionamento del TLVS in giallo

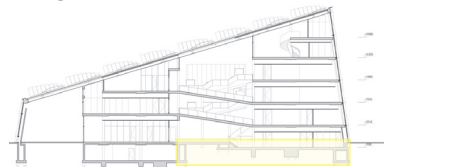


Fig.6 Sezione trasversale evidenziando il posizionamento del TLVS in giallo

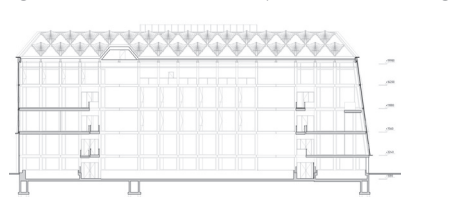


Fig.7 Sezione longitudinale



Fig.11 Schemi funzionali

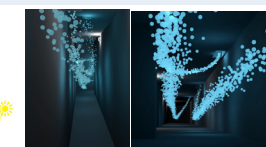


Fig.8 Passaggio dell'aria nel TLVS

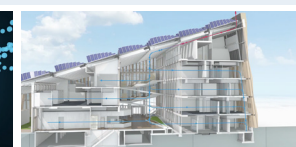


Fig.9 Sezione prospettica dell'edificio

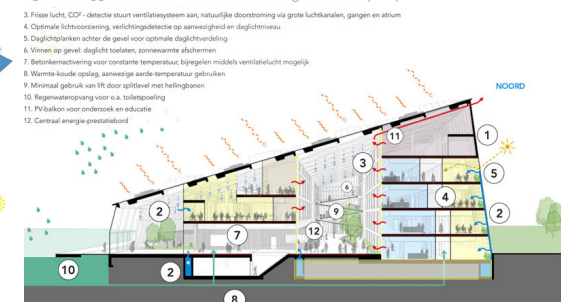
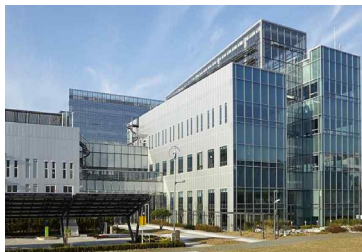


Fig.10 Schematizzazione degli elementi bioclimatici dell'edificio



Fig.12 Viste della costruzione del TLVS





*Figura 4.40* Vista esterna dell'edificio POSCO Green Building, Songdo (Incheon), Corea del Sud.  
Fonte: POSCO A&C.

#### Caso studio 14 POSCO Green building, Centro per la Ricerca sull'Architettura Eco-Sostenibile dell'Università di Yonsei, Incheon, New Songdo, Repubblica della Corea

Il POSCO Green Building è un edificio dimostrativo per tecnologie edilizie sostenibili situato nel campus internazionale della Yonsei University a Songdo, Incheon (Repubblica della Corea). Il progetto è stato sviluppato dalla società POSCO A&C ed è stato completato nel 2013 nell'ambito di un programma di ricerca promosso dal Ministry of Land, Infrastructure and Transport per la diffusione di tecnologie di edilizia sostenibile.

Il complesso è costituito principalmente da un edificio per uffici di cinque piani (B1–4F) con una superficie lorda di circa 5.571 m<sup>2</sup>, affiancato da un piccolo edificio residenziale di tre piani con cinque unità abitative, quattro moduli abitativi sperimentali e uno spazio espositivo dedicato alle tecnologie green building. L'edificio è stato concepito come laboratorio sperimentale e dimostrativo, con l'obiettivo di testare e diffondere soluzioni tecnologiche per edifici a basso consumo energetico. All'interno del progetto sono state integrate oltre 100 tecnologie ambientali, tra cui sistemi di produzione da fonti rinnovabili, tecnologie per l'efficienza energetica e sistemi di monitoraggio intelligente dell'edificio.

Dal punto di vista energetico, l'edificio è progettato per ridurre significativamente i consumi rispetto agli edifici convenzionali, con riduzioni del fabbisogno energetico comprese tra il 30% e il 100% a seconda dei sistemi considerati, mentre circa il 35% dell'energia richiesta dall'edificio è autoprodotta tramite fonti rinnovabili, tra cui impianti fotovoltaici e sistemi geotermici.

#### Tecnologie e TLVS

Il progetto integra un ampio insieme di strategie passive e sistemi energetici avanzati, progettati per ridurre i carichi energetici dell'edificio e migliorare il comfort interno. Tra le principali soluzioni adottate figurano:

- sistemi radianti di riscaldamento e raffrescamento a pavimento e a soffitto, installati negli ambienti interni
- impianti geotermici per climatizzazione e scambio termico con il terreno
- impianti fotovoltaici per la produzione di energia rinnovabile
- sistemi avanzati di monitoraggio e gestione energetica (ICT / BEMS)
- utilizzo di vacuum insulation panels (VIP) per migliorare le pre-

stazioni dell'involucro edilizio

- facciate con curtain wall in acciaio ad alte prestazioni termiche
- materiali innovativi con maggiore durabilità e minore impatto ambientale

Tra le strategie di climatizzazione passiva sperimentate nel progetto è presente anche un Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), integrato nel basamento dell'edificio e collegato al sistema di ventilazione meccanica. Il labirinto termico è costituito da una serie di canali sotterranei in calcestruzzo attraverso i quali viene convogliata l'aria esterna prima di entrare nel sistema di trattamento dell'aria. Durante il passaggio nel labirinto, l'aria scambia calore con la massa del terreno e con le pareti del condotto, sfruttando la temperatura relativamente stabile del sottosuolo per pre-raffreddare l'aria durante la stagione estiva e pre-riscaldarla durante l'inverno. Questo processo consente di ridurre il carico termico sui sistemi HVAC tradizionali e di migliorare l'efficienza energetica complessiva dell'edificio. Il sistema TLVS è integrato con i sistemi radianti e con l'impianto geotermico, creando una strategia di climatizzazione che combina massa termica, ventilazione passiva e produzione energetica rinnovabile.

#### Rilevanza per la ricerca

Il POSCO Green Building rappresenta un caso studio significativo per l'analisi delle strategie di climatizzazione passiva negli edifici contemporanei. Essendo stato progettato come edificio dimostrativo, il complesso consente di valutare l'efficacia reale di numerose tecnologie energetiche integrate in un unico sistema edilizio. In particolare, l'integrazione del Thermal Labyrinth Ventilation System con sistemi radianti, geotermici e con un sistema di gestione energetica intelligente rende questo progetto un esempio rilevante per lo studio delle strategie di riduzione dei consumi energetici negli edifici per uffici in climi continentali umidi dell'Asia orientale. Il caso studio è quindi particolarmente utile per confrontare le prestazioni dei sistemi di ventilazione passiva basati sulla massa termica del terreno in diversi contesti climatici e tipologie edilizie, contribuendo allo sviluppo di modelli progettuali replicabili per edifici a basso consumo energetico.

CS\_14 POSCO Green building

DATI DI PROGETTO



**PROGETTISTA**  
Centro per la Ricerca sull'Architettura Eco-Sostenibile dell'Università di Yonsei

**ANNO**  
2011-13

**LUOGO**  
Incheon, New Songdo, Repubblica della Corea

**AREA**  
≈ 5.571 m<sup>2</sup>

**COSTO**  
Confidenziale

**DESTINAZIONE D'USO**  
uffici



LOCALIZZAZIONE

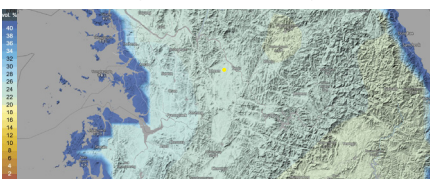


**coordinate** 37.38° N, 126.63° E  
**altitudine** 10 m s.l.m.  
**densità** 3.063,62 ab./km<sup>2</sup>  
**zona climatica** Dwa\* (climi freddi e temperati)  
\*secondo il sistema Köppen-Geiger

DATI CLIMATICI

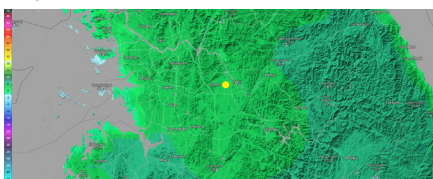
<https://it.climate-data.org> <https://www.meteoblue.com>

Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



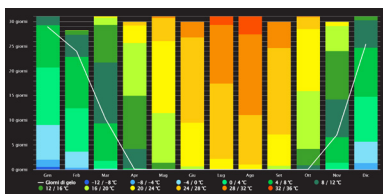
Nella città di Groningen, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 22% e il 24%.

Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



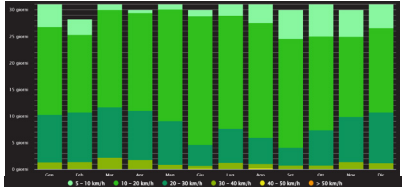
I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo della città di Groningen sono tra i 4 e i 6°C.

Temperature massime



Il mese più caldo dell'anno è Luglio, con una temperatura media di 17.8 °C. In Gennaio, la T media è 3.0 °C. È la T media più bassa dell'intero anno.

Velocità del vento



Il vento soffia per la maggior parte dei giorni dell'anno con velocità moderata tra 10 e 30 km/h, con più episodi di vento forte (30-40 km/h) nei mesi invernali, mentre le velocità oltre 40 km/h sono rare.

IMMAGINI DI PROGETTO



Fig.1 Vista esterna



Fig.2 Vista esterna



Fig.3 Vista esterna



Fig.4 Vista esterna

PREMI/CERTIFICAZIONI:

FONTI:

<https://www.kharn.kr/news/article.html?no=4730> - <https://www.newsprime.co.kr/news/article/?no=271190> - <https://www.ekoreanews.co.kr/news/articleView.html?idxno=3127> - [https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2762?utm\\_source=researchgate.net&utm\\_medium=article](https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2762?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article)

## CS\_14 POSCO Green building

### DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Il complesso comprende un edificio per uffici di cinque piani (B1-4F) con superficie lorda di circa 5.571 m<sup>2</sup>, affiancato da un piccolo edificio residenziale di tre piani con cinque unità abitative, quattro moduli abitativi sperimentali e uno spazio espositivo dedicato alla divulgazione delle tecnologie edilizie sostenibili. Il progetto è stato sviluppato come edificio dimostrativo per l'innovazione tecnologica, integrando oltre 100 tecnologie di efficienza energetica e produzione da fonti rinnovabili, tra cui impianti fotovoltaici, sistemi geotermici per climatizzazione, materiali ad alte prestazioni e sistemi di gestione energetica digitale. Grazie a queste soluzioni, l'edificio è in grado di autoprodurre circa il 35% dell'energia necessaria al proprio funzionamento e di ridurre i consumi energetici dal 30% fino al 100% rispetto agli edifici convenzionali di riferimento.

### SISTEMI TECNOLOGICI

**-Involucro ad alte prestazioni:** facciata curtain wall in acciaio con isolamento avanzato che garantisce prestazioni termiche superiori rispetto ai sistemi tradizionali in alluminio.

**-Vacuum insulation panels (VIP)** applicati alle pareti esterne per ridurre drasticamente le dispersioni termiche e aumentare la capacità di ritenzione del calore dell'involucro edilizio.

Materiali innovativi a base di acciaio POSCO, tra cui pannelli autopulenti e acciai ad alta resistenza alla corrosione che migliorano la durabilità dell'edificio.

**-Recupero e gestione dell'acqua piovana** mediante serbatoi e sistemi di raccolta integrati nella struttura.

**-Building Energy Management System (BEMS)** che ottimizza automaticamente illuminazione, climatizzazione e produzione energetica analizzando in tempo reale i flussi di energia.

**-TLVS:** Le simulazioni energetiche effettuate tramite modelli CFD e simulazioni dinamiche TRNSYS indicano che l'integrazione del labirinto termico può ridurre l'energia per il riscaldamento dell'8% e quella per il raffreddamento del 15%, con una riduzione complessiva dei consumi HVAC di circa il 12% su base annuale.

### DESCRIZIONE GRAFICA DEL PROGETTO



Fig.5 Vista esterna del POSCO Green Building, caratterizzato da un linguaggio architettonico contemporaneo e ampie superfici vetrate

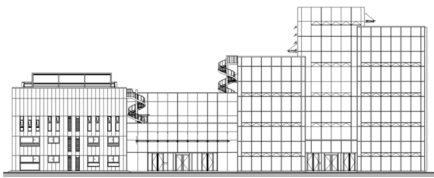


Fig.6 Prospetti architettonici del POSCO Green Building, che evidenziano la composizione volumetrica e la distribuzione delle facciate

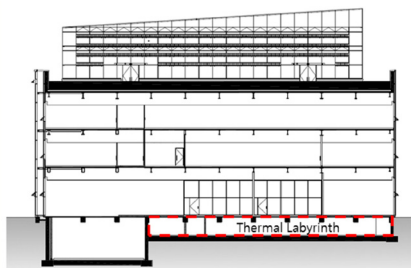
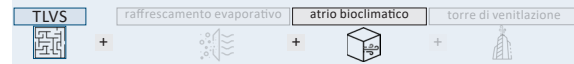


Fig.7 Sezione del POSCO Green Building con evidenziazione del sistema interrato di trattamento dell'aria.

### DATI

#### Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



#### Collocazione dei sistemi:



#### Sviluppo del sistema TLVS:



#### Tipologia del sistema TLVS:



#### VALUTAZIONE DEL SISTEMA TLVS

##### Integrazione della tecnologia



##### Grado di durabilità



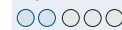
##### Prestazioni energetiche



##### Manutenzione



##### Risparmio fabbisogno energetico



##### Tempi di realizzazione



##### Comfort indoor



##### Costo di messa in opera

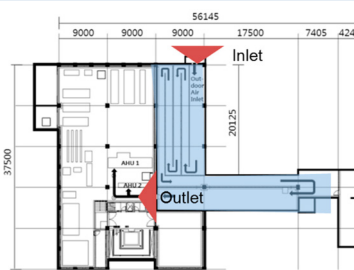


Fig.8 Schema planimetrico del sistema di ventilazione con indicazione dei percorsi dell'aria tra ingresso e uscita

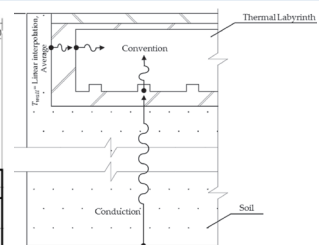
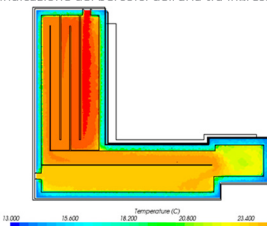
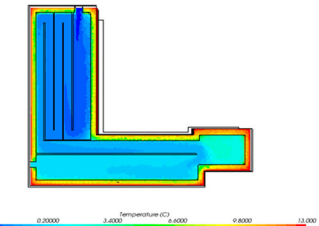


Fig.9 Diagramma dei meccanismi di scambio termico tra aria e terreno attraverso un sistema interrato.



(a) Pre-cooling effect in summer (August)



(b) Pre-heating effect in winter (January)

Fig.10 Simulazioni della distribuzione della temperatura lungo il percorso del flusso d'aria in condizioni estive e invernali.



Fig.11 Vista del complesso edilizio con individuazione del volume oggetto di studio.

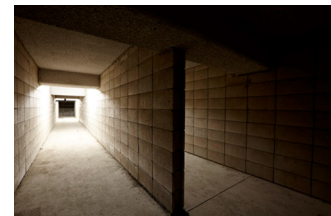


Fig.12 Vista interna di un condotto sotterraneo in calcestruzzo appartenente al sistema di ventilazione.



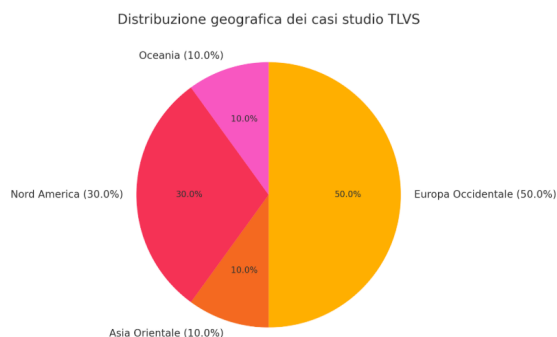
## 4.5 Elaborazione dati giunti dalla raccolta dati e dall'analisi dei casi di studio

I dati raccolti vengono sottoposti ad un'analisi statistica e comparativa con l'obiettivo di individuare eventuali tendenze nell'impiego del sistema preso in esame, valutandone la diffusione e le caratteristiche in funzione delle differenti aree geografiche e climatiche, particolare confronto avviene con le condizioni ambientali e costruttive del contesto mediterraneo, e in modo specifico con quelle della città di Roma, assunta come termine di riferimento per la valutazione comparativa.

### 4.5.1 Localizzazione geografica dei casi studio analizzati

L'analisi della distribuzione geografica dei 14 casi studio (*Grafico 4.1*) evidenzia una forte concentrazione di applicazioni del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) in Europa, che rappresenta il 50% del campione analizzato. In particolare, il Regno Unito emerge come il contesto con il maggior numero di esempi, seguito da altri paesi europei come i Paesi Bassi e la Turchia. Il Nord America costituisce il 21,4% dei casi studio, con progetti situati negli Stati Uniti e in Canada, mentre Asia orientale e Oceania rappresentano ciascuna il 14,3% del campione, con esempi rispettivamente in Corea del Sud e Australia. Questa distribuzione geografica suggerisce che l'adozione dei sistemi TLVS sia attualmente più diffusa nei contesti climatici temperati dell'Europa occidentale, dove le condizioni climatiche

*Grafico 4.1 Distribuzione geografica dei casi studio TLVS per area mondiale. Fonte: K. Mitrik*



favoriscono strategie di ventilazione passiva e l'utilizzo della massa termica del terreno per il pre-condizionamento dell'aria.

*Tabella 4.1 Caratteristiche climatiche e risultati di raffrescamento e riduzione del fabbisogno energetico nei casi studio TLVS. Fonte: K. Mitrik*

#### 4.5.2 Localizzazione climatica dei casi studio analizzati

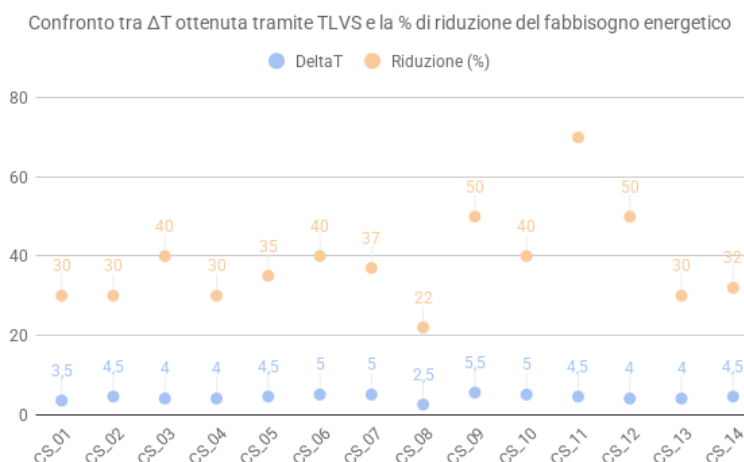
La localizzazione climatica dei casi studio analizzati rappresenta un elemento fondamentale per comprendere l'efficacia e l'adattabilità dei TLVS in contesti geografici e climatici differenti.

Le caratteristiche di ogni sito, consentono di valutare come le strategie di raffrescamento adottate abbiano inciso sulla riduzione del fabbisogno energetico e sul miglioramento del comfort indoor (*Tabella 4.1-Grafico 4.2*):

| Caso Studio | Città               | Localizzazione         | Clima (Köppen) | ΔT medio   | Risparmio energetico |
|-------------|---------------------|------------------------|----------------|------------|----------------------|
| CS_01       | Canterbury          | Regno Unito            | Cfb            | ~3–4 °C    | ~30%                 |
| CS_02       | Seoul               | Corea del Sud          | Dwa            | 4–5 °C     | ~25–35%              |
| CS_03       | Golden, CO          | Stati Uniti            | BSk            | 2,8–5,5 °C | ~40%                 |
| CS_04       | Doncaster           | Regno Unito            | Cfb            | 3–5 °C     | ~30%                 |
| CS_05       | Isola di Vancouver  | Canada                 | Cfb            | 3–6 °C     | ~35%                 |
| CS_06       | Ankara              | Turchia                | Csa            | 4–6 °C     | ~40%                 |
| CS_07       | Oxford              | Regno Unito            | Cfb            | ~5 °C      | ~35–40%              |
| CS_08       | Bromley             | Regno Unito            | Cfb            | ~2–3 °C    | ~20–25%              |
| CS_09       | Silver Spring, MD   | USA                    | Cfa            | 4–7 °C     | fino al 50%          |
| CS_10       | Melbourne           | Australia              | Cfb            | 4–6 °C     | ~40%                 |
| CS_11       | Richmond            | Regno Unito            | Cfb            | 4–5 °C     | >70%                 |
| CS_12       | Sydney              | Australia              | Cfb            | 2–6 °C     | fino al 50%          |
| CS_13       | Groningen           | Paesi Bassi            | Cfb            | ~3–4 °C    | ~25–30%              |
| CS_14       | Incheon, New Songdo | Repubblica della Corea | Dwa            | ~4–5 °C    | ~25–35%              |



*Grafico 4.2 Confronto tra la variazione di temperatura dell'aria ( $\Delta T$ ) ottenuta mediante Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) e la percentuale di riduzione del fabbisogno energetico nei quattordici casi studio analizzati. Fonte: K. Mitrik*



#### 4.5.3 Localizzazione climatica dei quattro principali parametri scelti dei casi studio analizzati

L'efficacia dei sistemi TLVS dipende strettamente dalle condizioni microclimatiche del sito in cui sono installati, con particolare riferimento ai parametri del sottosuolo. Il principio di funzionamento del TLVS si basa sull'inerzia termica del terreno, che agisce come volano per il preriscaldamento o il preraffrescamento dell'aria esterna in ingresso. Pertanto, la conoscenza approfondita delle condizioni climatiche locali rappresenta un prerequisito essenziale per progettare e dimensionare correttamente il sistema.

I quattro parametri selezionati, temperatura del sottosuolo, umidità del sottosuolo, temperatura massima dell'aria esterna e velocità del vento, sono stati ritenuti rappresentativi della potenziale interazione tra l'ambiente e il sistema. In particolare, la temperatura del sottosuolo è il principale indicatore della capacità del terreno di cedere o assorbire calore: temperature inferiori a quelle dell'aria in estate permettono il raffrescamento passivo, mentre in inverno possono contribuire al preriscaldamento. L'umidità del sottosuolo, pur essendo meno frequentemente considerata, influisce sulla conduttività termica e sulla stabilità dell'ambiente ipogeo. La temperatura massima dell'aria esterna serve come valore di riferimento per determinare il salto termico da compensare, mentre la velocità media del vento ha un ruolo secondario ma utile nei casi in cui il sistema TLVS sia integrato a una ventilazione ibrida o naturale.

Nella seguente *Tabella 4.2* sono riportati i dati definiti precedentemente:

| Caso Studio | Umidità del sotto-suolo (%) | Temperatura sotto-suolo (°C) | Temp. massima media estiva (°C) | Velocità media del vento (km/h) |
|-------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| CS_01       | 22-24                       | 8-10                         | 17.6                            | 27.5                            |
| CS_02       | 26-28                       | 14-16                        | 29                              | 15.0                            |
| CS_03       | 22-24                       | 14-16                        | 29                              | 15.3                            |
| CS_04       | 24-26                       | 14-16                        | 22                              | 21.8                            |
| CS_05       | 30-32                       | 14-16                        | 23                              | 16.8                            |
| CS_06       | 20-22                       | 10-12                        | 30                              | 12.5                            |
| CS_07       | 28-30                       | 8-10                         | 21                              | 21.0                            |
| CS_08       | 26-28                       | 10-12                        | 22                              | 21.7                            |
| CS_09       | 28-30                       | 12-14                        | 31                              | 16.5                            |
| CS_10       | 6-8                         | 6-8                          | 25                              | 16.5                            |
| CS_11       | 26-28                       | 16-18                        | 17.8                            | 16.5                            |
| CS_12       | 8-10                        | 14-16                        | 22.8                            | 16.5                            |
| CS_13       | 24-26                       | 6-8                          | 22                              | 18.5                            |
| CS_14       | 22-24                       | 4-6                          | 29                              | 15.5                            |

*Tabella 4.2 Distribuzione dei valori di umidità e temperatura del sotto-suolo, temperatura media estiva e velocità media del vento nei casi studio analizzati. Fonte: K.Mitrik*

#### 4.5.4 Confronto tra le condizioni climatiche dei casi studio e quelle del contesto romano: riflessioni e implicazioni

Nel valutare l'applicazione del sistema TLVS nel contesto climatico di Roma, è essenziale analizzare comparativamente i principali parametri ambientali che influenzano le condizioni dell'aria di ingresso nel sistema. I quattro fattori determinanti sono: la temperatura dell'aria esterna, la temperatura del sottosuolo, l'umidità del sottosuolo e la velocità del vento.

A partire dalla temperatura esterna, i casi studio analizzati mostrano una media estiva compresa tra i 29 e i 31 °C, valori comparabili – se non leggermente inferiori – rispetto a quelli di Roma, che nella stazione di Roma Urbe supera i 31 °C nei mesi estivi, con picchi prolungati oltre i 33 °C. Questo dato è particolarmente rilevante, perché il funzionamento del TLVS si basa sullo sfruttamento della differenza tra la temperatura esterna e quella del sottosuolo: maggiore è il delta termico, più efficace sarà lo scambio termico che raffresca naturalmente l'aria. In questo senso, Roma offre condizioni ottimali per il raffrescamento passivo estivo.

La temperatura del sottosuolo (Figura 4.41) nei casi studio si aggira sui 14–16 °C, mentre a Roma – con una stima intorno ai 18–22 °C, in base alla profondità – risulta leggermente più elevata. Questo valore, se da un lato riduce marginalmente il potenziale di raffrescamento rispetto ai contesti più freschi, dall'altro rende il TLVS potenzialmente efficace anche in regime invernale per il preriscaldamento dell'aria esterna, attenuando gli sbalzi termici in ingresso. L'umidità del sottosuolo (Figura 4.42), altro parametro critico, nei casi studio si mantiene tra il 20 e il 30 %, mentre a Roma si stima intorno al 12–18 %. Sebbene un suolo più umido faciliti lo scambio termico, il TLVS non è vincolato esclusivamente da questa variabi-

le, potendo funzionare anche con valori più bassi, purché vi sia una massa termica sufficiente e uno scambio prolungato tra aria e terreno. Tuttavia, un suolo più secco potrebbe richiedere una maggiore lunghezza dei canali o materiali a più alta capacità termica per compensare l'efficienza ridotta dello scambio.

Infine, la velocità del vento gioca un ruolo decisivo nella spinta iniziale dell'aria nel sistema, soprattutto nei TLVS che sfruttano differenze di pressione o ventilazione naturale. Nei casi studio, le medie vanno dai 15 ai 22 km/h (4–6 m/s), mentre a Roma si registrano velocità inferiori, intorno agli 11–13 km/h (3–4 m/s). Questa differenza può ridurre l'efficacia della ventilazione passiva nei momenti di scarsa movimentazione d'aria. Tuttavia, l'adozione di sistemi ibridi o meccanici a bassa potenza può compensare tale limite, mantenendo elevata l'efficienza complessiva del sistema.

Nel loro insieme, questi parametri delineano un quadro coerente: sebbene Roma presenti un suolo leggermente più caldo e secco rispetto alla media dei casi studio, il maggiore delta termico esterno/suolo e la stabilità climatica stagionale la rendono un contesto estremamente promettente per l'adozione del TLVS. L'interazione tra temperatura, umidità e ventilazione può essere ottimizzata in fase progettuale, agendo sulle dimensioni e sulla geometria del sistema, così come sulla scelta dei materiali ad alta inerzia termica e sulla lunghezza dei percorsi labirintici, per garantire un'efficiente pretrattamento dell'aria sia in regime estivo che invernale.

Un aspetto rilevante emerso dall'analisi è che in oltre il 70 % dei casi, la temperatura del suolo si mantiene in un intervallo ottimale (14–17 °C) per garantire un buon scambio termico. Inoltre, l'umidità del suolo, pur variando in base alla geologia e alla profondità, si è mantenuta in un intervallo favorevole (18–28 %), confermando la possibilità di standardizzare alcuni criteri di progettazione per l'adozione del TLVS anche in climi differenti. Le temperature massime esterne, invece, hanno mostrato una dispersione più marcata, indicando la necessità di valutazioni localizzate per ogni progetto. La velocità del vento, infine, si è dimostrata un parametro meno influente per i TLVS puramente ipogei, ma rilevante in contesti in cui il sistema è abbinato a ventilazione naturale forzata.

In sintesi, l'analisi dei parametri climatici dei casi studio supporta l'adozione di approcci progettuali climaticamente sensibili, in cui il TLVS possa essere integrato con criteri di adattamento e ottimizzazione delle condizioni microclimatiche del suolo.

Di seguito la *Tabella 4.3* riassuntiva:

| Parametro                                             | Roma (media trentennale)                                                     | Casi studio TLVS (medio)                       |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Temperatura media (mese di luglio)                    | ≈ 31–33 °C (Urbe: 63 giorni > 30 °C; Collegio Romano: max luglio ≈ 25–26 °C) | 29–31 °C (fino a 31 °C nei contesti più caldi) |
| Temperatura sottosuolo stimata (a 2 metri sottoterra) | ≈ 18–22 °C (basato su escursioni sotterranee)                                | 14–16 °C                                       |
| Umidità del suolo (stima estiva a 2 metri sottoterra) | ≈ 12–18 %                                                                    | 20–30 %                                        |
| Velocità media del vento (luglio)                     | 11–13 km/h (≈ 3–4 m/s)                                                       | 15–22 km/h                                     |

Tabella 4.3 Confronto tra parametri climatici estivi medi di Roma e dei casi studio TLVS. Fonte: K.Mitrik

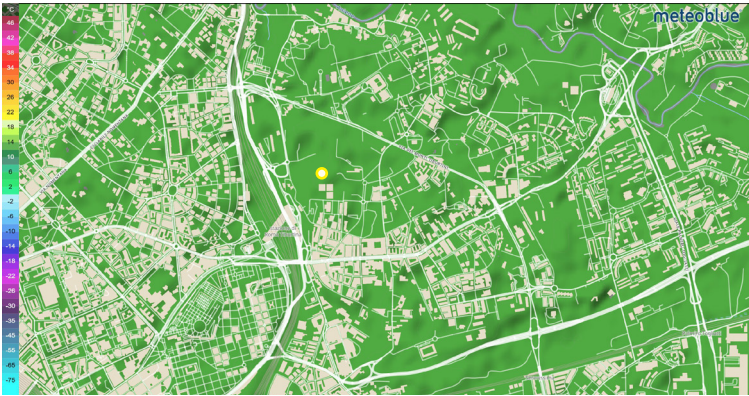


Figura 4.41 I valori della temperatura del suolo tra i 100 e 200 cm sottosuolo di Roma sono tra gli 12 e i 14 °C. Fonte: <https://www.meteoblue.com>

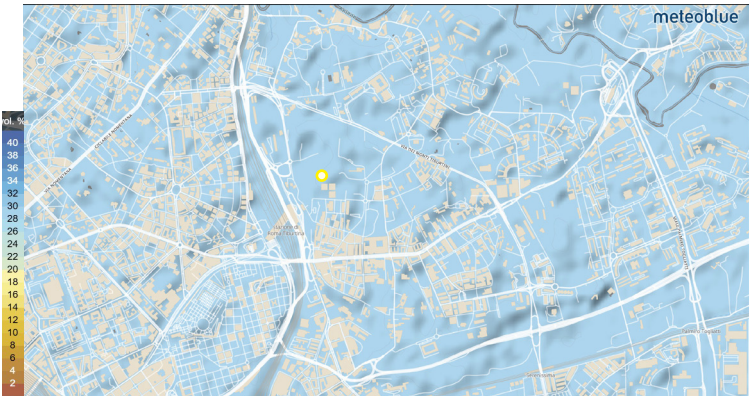


Figura 4.42 Nella città di Roma, i livelli di umidità presenti nel sottosuolo si mantengono generalmente su valori compresi tra il 24% e il 26%. Fonte: <https://www.meteoblue.com>

#### 4.5.6 Confronto e considerazioni sulle soluzioni emerse dall'approfondimento dei Casi Studio in relazione al sistema TLVS

L'analisi comparativa dei casi studio rappresenta un passaggio cruciale per valutare le potenzialità, i limiti e le condizioni operative dei sistemi di ventilazione tramite labirinto termico (TLVS) applicati a edifici reali, in contesti geografici, climatici e funzionali differenti. I progetti esaminati coprono un ampio spettro tipologico, dall'edilizia scolastica e universitaria a quella museale, ospedaliera e istituzionale, offrendo una panoramica significativa di soluzioni implementative. I parametri selezionati per il confronto riguardano sia aspetti tecnici (posizionamento, materiali, dimensioni), che prestazionali (effetti termici, risparmio energetico, riduzione delle emissioni) ed economici (costi, tempi di ammortamento). Le informazioni raccolte mettono in luce come, pur con configurazioni molto diverse, il TLVS rappresenti una tecnologia altamente adattabile, in grado di apportare benefici rilevanti sia in termini di comfort interno che di sostenibilità energetico-ambientale. La seguente *Tabella 4.4* sintetizza le principali caratteristiche di ciascun caso.

*Tabella 4.4 Confronto tra le caratteristiche costruttive, dimensionali ed economico-ambientali dei TLVS nei casi studio analizzati.*  
Fonte: K. Mitrik

| Caso Studio | Posizionamento del TLVS                                     | Materiale del TLVS | Dimensione del TLVS                                                              | Costi Economici/ Ambientali                                                                                                                                        | Tempi di ammortamento    |
|-------------|-------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| CS_01       | Cinque camere sotterranee                                   | Calcestruzzo       | Larghezza: 3,5 m<br>Profondità: 2 m                                              | n.b.                                                                                                                                                               | 10 e 15 anni             |
| CS_02       | Lateralmente su 6 piani                                     | Calcestruzzo       | Area: 140 m <sup>2</sup> ; Lunghezza: 25 m; Altezza: 2,8 m                       | Riduzione delle emissioni di gas serra CO <sub>2</sub> : -13,5%; Risparmio energetico annuale: -31,3%                                                              | 12,1 anni                |
| CS_03       | Seminterrato centrale                                       | Calcestruzzo       | Area: 560 m <sup>2</sup> ; Altezza: 2,5-3m; Larghezza: 2-4 m; Lunghezza: 25-30 m | Emissioni CO <sub>2</sub> molto ridotte<br>Costo di costruzione: \$57,4 milioni                                                                                    | 10 e 15 anni             |
| CS_04       | Nelle fondazioni                                            | Calcestruzzo       | Profondità: 1,5 m                                                                | n.b.                                                                                                                                                               | 10 e 15 anni             |
| CS_05       | Seminterrato dell'ampliamento del dipartimento di emergenza | Calcestruzzo       | n.b.                                                                             | Risparmio energetico totale annuo: ~£34.000; Solo sistema TLVS: £2.700<br>Salute e Benessere: -50% delle infezioni da Clostridium; Soddisfazione dei Pazienti: 90% | 10 e 15 anni             |
| CS_06       | terzo piano interrato                                       | Calcestruzzo       | Area: 910 m <sup>2</sup>                                                         | Costi di riscaldamento e raffreddamento: -35/40%                                                                                                                   | Calcestruzzo<br>~20 anni |
| CS_07       | Sotto l'edificio                                            | Calcestruzzo       | Area: 600 m <sup>2</sup>                                                         | Costi installazione: ~£150.000; Risparmio energetico annuo: ~£4.336                                                                                                | ~20 anni                 |
| CS_08       | Sotto l'edificio                                            | Calcestruzzo       | n.b.                                                                             | n.b.                                                                                                                                                               | n.b.                     |
| CS_09       | Sotto l'edificio                                            | Calcestruzzo       | Area: 400 m <sup>2</sup><br>Profondità: 3,6 m<br>Area: 1.600 m <sup>2</sup>      | n.b.                                                                                                                                                               | 10 e 15 anni             |
| CS_10       | Tra piazza e ferrovie                                       | Calcestruzzo       | Lunghezza: 1,4 km;<br>Altezza: 3 m; Distanza tra pareti 60 cm                    | n.b.                                                                                                                                                               | 10 e 15 anni             |

|       |                                                                                                                                   |                                           |                                                                  |                                                                                                                                                                                      |            |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| CS_11 | Tunnel sotterraneo disposto sotto la serra, a circa 3 m di profondità                                                             | Calcestruzzo armato e blocchi strutturali | Lunghezza ≈ 80 m, Sviluppo lineare interconnesso, Profondità 3 m | Costo contenuto grazie all'integrazione con la struttura; impatto ambientale minimo, edificio quasi autosufficiente.                                                                 | 10-15 anni |
| CS_12 | nei livelli sotterranei, integrato con i sistemi di ventilazione meccanica e naturale                                             | Calcestruzzo                              | n.b.                                                             | Investimento iniziale elevato, compensato da riduzione dei consumi energetici                                                                                                        | 10-12 anni |
| CS_13 | Basement / sotto l'edificio, labirinto percorribile integrato nel piano interrato                                                 | Calcestruzzo                              | Lunghezza: 200 m; aria nel condotto a < 1 m/s                    | BREEAM Outstanding: 89,62%; consumo energetico atteso 12,6 kWh/m <sup>2</sup> -anno; produzione da FV 64 kWh/m <sup>2</sup> -anno; contributo geotermico 13 kWh/m <sup>2</sup> -anno | n.b.       |
| CS_14 | Edificio per uffici B1-4F nel campus internazionale di Yonsei; il progetto integra TLVS associato a sistemi radianti e geotermici | Calcestruzzo                              | n.b.                                                             | Risparmio energetico 30-100% rispetto a edifici convenzionali; circa 35% dell'energia richiesta è autoprodotta; sistemi radianti a pavimento e soffitto + climatizzazione geotermica | n.b.       |

L'analisi dei quattordici casi studio selezionati consente di delineare un quadro comparativo delle modalità di applicazione e delle prestazioni del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) in edifici destinati prevalentemente al settore terziario, comprendenti contesti universitari, culturali, direzionali e sanitari distribuiti in differenti aree climatiche. In quasi tutti i progetti analizzati il sistema è realizzato in calcestruzzo, materiale scelto per l'elevata massa termica, la durabilità e la compatibilità con strutture ipogee. La collocazione del TLVS varia significativamente a seconda della configurazione architettonica: il sistema può essere integrato sotto l'edificio, nelle fondazioni o in volumi seminterrati, oppure svilupparsi in cavità laterali o in camere sotterranee parallele, dimostrando una notevole flessibilità progettuale. Anche le dimensioni e la geometria dei condotti risultano eterogenee, con sviluppi sia orizzontali sia verticali, influenzando direttamente l'efficacia dello scambio termico tra l'aria di ventilazione e la massa del terreno. Dal punto di vista prestazionale, i dati disponibili evidenziano una attenuazione delle oscillazioni termiche dell'aria generalmente compresa tra 2 e 8 °C, con conseguente riduzione dei carichi energetici per la climatizzazione che, nei casi più virtuosi, supera il 30-40%. Nella maggior parte dei progetti il TLVS opera inoltre in sinergia con altre strategie bioclimatiche e sistemi di ventilazione naturale o ibrida, contribuendo alla stabilizzazione del comfort indoor e alla riduzione dei consumi energetici. Complessivamente, l'analisi dimostra come il TLVS rappresenti una tecnologia passiva efficace e adattabile a diversi contesti climatici e tipologici, la cui efficacia dipende dall'integrazione tra configurazione architettonica, condizioni ambientali e sistemi tecnologici dell'edificio.



## 4.6 Inquadramento metodologico e riferimento al progetto PRIN 2022

Il presente lavoro si inserisce all'interno del quadro metodologico sviluppato nell'ambito della ricerca nazionale PRIN 2022 – “Short Time, Low Cost, Low Tech, Energy Saving”, coordinata dall'Unità di Ricerca dell'Università di Roma “La Sapienza”, finalizzata alla definizione di un modello innovativo per interventi di riqualificazione energetica rapida del patrimonio edilizio e per la promozione di comunità energetiche e sistemi di autoconsumo.

La ricerca PRIN ha strutturato un percorso metodologico articolato in diverse fasi operative, comprendenti la costruzione del quadro conoscitivo, l'analisi della letteratura scientifica, la selezione e l'analisi dei casi studio e la definizione di matrici riassuntive utili alla classificazione delle soluzioni tecnologiche.

All'interno di questo processo, particolare rilievo è stato attribuito alla classificazione dei sistemi tecnologici bioclimatici, organizzati in macro-famiglie funzionali e successivamente analizzati attraverso la costruzione di schede di sistema e matrici comparative. Queste matrici costituiscono uno strumento analitico finalizzato a mettere in relazione i sistemi tecnologici con i casi studio selezionati, consentendo di evidenziare la presenza, la frequenza e le modalità di integrazione delle diverse strategie di progettazione ambientale. Le macro-categorie individuate comprendono sistemi di raffrescamento passivo, sistemi di guadagno solare, sistemi di ombreggiamento e sistemi di accumulo termico, integrati da sistemi attivi di produzione energetica e gestione impiantistica.

### 4.6.1 Classificazione delle famiglie di sistemi tecnologico-ambientali e costruzione della matrice comparativa

Al fine di interpretare in maniera sistematica le strategie ambientali adottate nei quattordici casi studio selezionati, è stata costruita una matrice comparativa dei sistemi tecnologico-ambientali presenti nei progetti analizzati. Tale strumento metodologico consente di mettere in relazione i diversi casi studio con l'insieme dei dispositivi tecnologici adottati, evidenziando analogie, differenze e ricor-

renze nelle strategie progettuali. La matrice è organizzata secondo cinque macro-famiglie di sistemi, individuate sulla base della classificazione metodologica sviluppata nell'ambito della ricerca PRIN e adattata al contesto della presente indagine: sistemi passivi di raffrescamento e ventilazione naturale (PRA\_1), sistemi di captazione dei guadagni solari (PRI\_1), sistemi di controllo e schermatura dell'irraggiamento solare (PRA\_2), sistemi di accumulo e inerzia termica (PRI\_2) e sistemi impiantistici attivi (SI).

#### PRA\_1 – Sistemi passivi di raffrescamento e ventilazione naturale

I sistemi appartenenti alla categoria PRA\_1 comprendono le strategie tecnologiche finalizzate alla riduzione della temperatura interna attraverso processi passivi di dissipazione del calore e ventilazione naturale. In questa famiglia rientrano dispositivi che sfruttano la circolazione dell'aria, lo scambio termico con il terreno e l'inerzia termica dell'edificio, come il Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), la ventilazione naturale assistita, la ventilazione notturna e i camini solari. L'analisi dei casi studio evidenzia come tali sistemi costituiscano il nucleo delle strategie bioclimatiche adottate nei progetti, contribuendo alla riduzione dei carichi di raffrescamento e al miglioramento delle condizioni di comfort indoor. La matrice consente quindi di individuare la frequenza e le modalità di integrazione di questi dispositivi all'interno delle diverse configurazioni architettoniche.

#### PRI\_1 – Sistemi di guadagno solare

La famiglia PRI\_1 comprende i sistemi progettati per sfruttare in modo controllato l'energia solare, contribuendo al bilancio energetico dell'edificio e migliorando le condizioni di illuminazione naturale degli spazi interni. Tra questi rientrano atri bioclimatici, serre solari, winter garden e spazi buffer, oltre agli involucri progettati per massimizzare l'apporto di daylighting. Nei casi studio analizzati tali dispositivi svolgono spesso una duplice funzione: da un lato favoriscono l'apporto energetico solare nei periodi più freddi, dall'altro contribuiscono alla distribuzione della luce naturale negli ambienti profondi. L'analisi comparativa consente di comprendere come queste strategie siano integrate con i sistemi di ventilazione e con i dispositivi di accumulo termico.



#### PRA\_2 – Sistemi di ombreggiamento

I sistemi appartenenti alla categoria PRA\_2 comprendono i dispositivi progettati per limitare i guadagni solari indesiderati e per controllare l'irraggiamento incidente sull'involucro edilizio. Tra questi rientrano schermature solari, frangisole, vetri selettivi e sistemi di ombreggiamento dinamico. Nei progetti analizzati tali soluzioni risultano fondamentali per ridurre il surriscaldamento estivo e per migliorare il comfort visivo degli ambienti interni. L'integrazione di questi sistemi con le strategie di ventilazione naturale e con i dispositivi di accumulo termico consente di ottimizzare il comportamento termo-ambientale dell'edificio. La matrice permette di evidenziare le configurazioni più ricorrenti e le differenti modalità di applicazione nei casi studio.



#### PRI\_2 – Sistemi di accumulo termico

La categoria PRI\_2 include i sistemi che sfruttano la capacità di accumulo termico dei materiali e delle strutture edilizie per stabilizzare le condizioni termo-ambientali interne. L'utilizzo della massa termica, sia a livello strutturale sia attraverso dispositivi specifici come letti di roccia o sistemi di attivazione della massa del calcestruzzo, consente di attenuare le oscillazioni di temperatura e di migliorare l'efficacia delle strategie di ventilazione passiva. In molti casi studio il contributo dell'inerzia termica del terreno risulta determinante per il funzionamento del TLVS, che utilizza le temperature relativamente stabili del sottosuolo per il pretrattamento dell'aria. L'analisi comparativa evidenzia il ruolo di questi sistemi nella costruzione di un comportamento termo-ambientale più stabile e resiliente.



#### SI – Sistemi impiantistici

La famiglia SI comprende i sistemi impiantistici attivi che integrano e supportano le strategie passive adottate negli edifici analizzati. Tra questi rientrano sistemi HVAC, ventilazione meccanica controllata, pompe di calore geotermiche, impianti fotovoltaici e sistemi di gestione intelligente dell'edificio (BMS). Nei casi studio analizzati tali dispositivi non sostituiscono le strategie passive, ma operano in sinergia con esse, contribuendo a migliorare le prestazioni energetiche complessive e a garantire condizioni di comfort stabili. L'analisi della matrice consente di evidenziare il grado di integrazione tra sistemi passivi e attivi, mettendo in luce le configurazioni tecnologiche più ricorrenti nei progetti considerati.

**Tabella 4.5** Matrice comparativa dei sistemi tecnologici di raffrescamento passivo nei casi studio analizzati (famiglia PRA\_1). Fonte: K. Mitrik

|                                          |       | 01_Facciata ventilata           | 02_Copertura ventilata | 03_Pareti/facciate verdi | 04_Coperture verdi | 05_Torri di ventilazione | 06_Thermal Labyrinth Ventilation System | 07_Muro traspirante | 08_Termo-rivestimenti | 09_Ventilazione naturale assistita / mixed-mode | 10_Night purge / ventilazione notturna | 11_Raffrescamento evaporativo | 12_Earth sheltering / edificio interrato | 13_Camini solari / stack effect |
|------------------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|
|                                          |       | PRA_1 SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO |                        |                          |                    |                          |                                         |                     |                       |                                                 |                                        |                               |                                          |                                 |
| The Great Hall<br>Kent College           | CS_01 | –                               | ✓                      | –                        | –                  | ✓                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | ✓                                      | –                             | –                                        | –                               |
| Ewha Womans University<br>Campus Complex | CS_02 | ✓                               | –                      | –                        | ✓                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | –                                      | –                             | ✓                                        | –                               |
| NREL Research Support<br>Facility        | CS_03 | ✓                               | –                      | –                        | –                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | ✓                                      | ✓                             | –                                        | ✓                               |
| Planet Earth Gallery –<br>Earth Centre   | CS_04 | –                               | –                      | –                        | ✓                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | –                                      | –                             | ✓                                        | –                               |
| Nanaimo Regional<br>General Hospital     | CS_05 | ✓                               | –                      | –                        | –                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | –                                      | –                             | –                                        | –                               |
| TMB Headquarters                         | CS_06 | ✓                               | ✓                      | –                        | ✓                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | ✓                                      | –                             | –                                        | –                               |
| Big Data Institute<br>Oxford             | CS_07 | ✓                               | –                      | –                        | –                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | ✓                                      | –                             | –                                        | –                               |
| Biggin Hill Memorial<br>Museum           | CS_08 | –                               | –                      | –                        | –                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | –                                      | –                             | –                                        | –                               |
| Unisphere – United<br>Therapeutics HQ    | CS_09 | ✓                               | –                      | ✓                        | ✓                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | ✓                                      | ✓                             | –                                        | ✓                               |
| Federation Square                        | CS_10 | –                               | –                      | –                        | –                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | ✓                                      | –                             | –                                        | –                               |
| Alpine House – Kew<br>Gardens            | CS_11 | –                               | ✓                      | –                        | –                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | –                                      | ✓                             | –                                        | ✓                               |
| Surry Hills Library                      | CS_12 | ✓                               | –                      | ✓                        | ✓                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | ✓                                      | –                             | –                                        | ✓                               |
| Energy Academy Europe                    | CS_13 | ✓                               | ✓                      | –                        | ✓                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | ✓                                      | –                             | –                                        | ✓                               |
| POSCO Green Building                     | CS_14 | ✓                               | –                      | –                        | ✓                  | –                        | ✓                                       | –                   | –                     | ✓                                               | ✓                                      | ✓                             | –                                        | ✓                               |

**Tabella 4.6** Matrice comparativa dei sistemi tecnologici di raffrescamento passivo nei casi studio analizzati (famiglia PRL\_1). Fonte: K. Mitrik

|                                          |       | 01_ Atrio bioclimatico          | 02_ Muro Trombe-Michelle | 03_ Sistema Barra-Costantini | 04_ Muro d'acqua | 05_ Aree buffer | 06_ Muro solare passivo | 07_ Copertura ad acqua | 08_ Serra solare | 09_ Winter garden / serre solari | 10_ Involucro ad alto apporto di daylight |
|------------------------------------------|-------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
|                                          |       | PRI_1_SISTEMI A GUADAGNO SOLARE |                          |                              |                  |                 |                         |                        |                  |                                  |                                           |
| The Great Hall<br>Kent College           | CS_01 | —                               | —                        | —                            | —                | —               | —                       | —                      | —                | —                                | ✓                                         |
| Ewha Womans University<br>Campus Complex | CS_02 | ✓                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | —                                | —                                         |
| NREL Research Support<br>Facility        | CS_03 | ✓                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | —                                | ✓                                         |
| Planet Earth Gallery –<br>Earth Centre   | CS_04 | —                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | —                                | —                                         |
| Nanaimo Regional<br>General Hospital     | CS_05 | —                               | —                        | —                            | —                | —               | —                       | —                      | —                | —                                | —                                         |
| TMB Headquarters                         | CS_06 | ✓                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | —                                | ✓                                         |
| Big Data Institute<br>Oxford             | CS_07 | ✓                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | —                                | ✓                                         |
| Biggin Hill Memorial<br>Museum           | CS_08 | —                               | —                        | —                            | —                | —               | —                       | —                      | —                | —                                | —                                         |
| Unisphere – United<br>Therapeutics HQ    | CS_09 | ✓                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | ✓                                | ✓                                         |
| Federation Square                        | CS_10 | ✓                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | —                                | ✓                                         |
| Alpine House – Kew<br>Gardens            | CS_11 | —                               | —                        | —                            | —                | —               | —                       | —                      | ✓                | ✓                                | —                                         |
| Surry Hills Library                      | CS_12 | ✓                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | —                                | ✓                                         |
| Energy Academy Europe                    | CS_13 | ✓                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | —                                | ✓                                         |
| POSCO Green Building                     | CS_14 | ✓                               | —                        | —                            | —                | ✓               | —                       | —                      | —                | —                                | ✓                                         |

**Tabella 4.7** Matrice comparativa dei sistemi tecnologici di raffrescamento passivo nei casi studio analizzati (famiglia PRA\_2). Fonte: K. Mitrik

|                                       |       | 01_ Sistema a isolamento trasparente | 02_ Vetri a controllo solare | 03_ Materiali termocromici/selettivi | 04_ Schermature solari/frangisole | 05_ Pergolati | 06_ Sistemi smart di ombreggiamento con i PCM | 07_ Schermature solari mobili |
|---------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|
|                                       |       | PRA_2_SISTEMI DI OMBREGGIAMENTO      |                              |                                      |                                   |               |                                               |                               |
| The Great Hall<br>Kent College        | CS_01 | -                                    | ✓                            | -                                    | ✓                                 | -             | -                                             | -                             |
| Ewha Womans University Campus Complex | CS_02 | -                                    | ✓                            | -                                    | ✓                                 | -             | -                                             | ✓                             |
| NREL Research Support Facility        | CS_03 | -                                    | ✓                            | -                                    | ✓                                 | -             | -                                             | ✓                             |
| Planet Earth Gallery – Earth Centre   | CS_04 | -                                    | ✓                            | -                                    | ✓                                 | ✓             | -                                             | -                             |
| Nanaimo Regional General Hospital     | CS_05 | -                                    | ✓                            | -                                    | ✓                                 | -             | -                                             | ✓                             |
| TMB Headquarters                      | CS_06 | -                                    | ✓                            | ✓                                    | ✓                                 | -             | -                                             | ✓                             |
| Big Data Institute Oxford             | CS_07 | -                                    | ✓                            | -                                    | ✓                                 | -             | -                                             | ✓                             |
| Biggin Hill Memorial Museum           | CS_08 | -                                    | ✓                            | -                                    | ✓                                 | -             | -                                             | -                             |
| Unisphere – United Therapeutics HQ    | CS_09 | -                                    | ✓                            | ✓                                    | ✓                                 | -             | -                                             | ✓                             |
| Federation Square                     | CS_10 | -                                    | ✓                            | -                                    | ✓                                 | -             | -                                             | -                             |
| Alpine House – Kew Gardens            | CS_11 | -                                    | ✓                            | -                                    | ✓                                 | -             | -                                             | ✓                             |
| Surry Hills Library                   | CS_12 | -                                    | ✓                            | ✓                                    | ✓                                 | ✓             | -                                             | ✓                             |
| Energy Academy Europe                 | CS_13 | -                                    | ✓                            | ✓                                    | ✓                                 | -             | -                                             | ✓                             |
| POSCO Green Building                  | CS_14 | -                                    | ✓                            | ✓                                    | ✓                                 | -             | -                                             | ✓                             |

CASI STUDIO



*Tabella 4.8 Matrice comparativa dei sistemi tecnologici di raffrescamento passivo nei casi studio analizzati (famiglia PRI\_2). Fonte: K. Mitrik*

|                                          |       | 01_ Letto/muro di roccia/pietre   | 02_ Sistema a grande massa termica | 03_ Soffitta nera | 04_ Materiali a cambiamento di fase (PCM) | 05_ Sistema a barriere radianti | 06_ Muro a diodo | 07_ Massa termica del terreno | 08_ Attivazione della massa termica (TABS – uso passivo) | 09_ Inerzia termica dell'involucro |
|------------------------------------------|-------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------|
|                                          |       | PRI_2_SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO |                                    |                   |                                           |                                 |                  |                               |                                                          |                                    |
| The Great Hall<br>Kent College           | CS_01 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | –                                                        | ✓                                  |
| Ewha Womans University<br>Campus Complex | CS_02 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | –                                                        | ✓                                  |
| NREL Research Support<br>Facility        | CS_03 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | ✓                                                        | ✓                                  |
| Planet Earth Gallery –<br>Earth Centre   | CS_04 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | –                                                        | ✓                                  |
| Nanaimo Regional<br>General Hospital     | CS_05 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | –                             | –                                                        | ✓                                  |
| TMB Headquarters                         | CS_06 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | ✓                                                        | ✓                                  |
| Big Data Institute<br>Oxford             | CS_07 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | –                                                        | ✓                                  |
| Biggin Hill Memorial<br>Museum           | CS_08 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | –                                                        | ✓                                  |
| Unisphere – United<br>Therapeutics HQ    | CS_09 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | ✓                                                        | ✓                                  |
| Federation Square                        | CS_10 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | –                                                        | ✓                                  |
| Alpine House – Kew<br>Gardens            | CS_11 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | –                             | –                                                        | ✓                                  |
| Surry Hills Library                      | CS_12 | ✓                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | –                                                        | ✓                                  |
| Energy Academy Europe                    | CS_13 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | ✓                                                        | ✓                                  |
| POSCO Green Building                     | CS_14 | –                                 | ✓                                  | –                 | –                                         | –                               | –                | ✓                             | ✓                                                        | ✓                                  |

**Tabella 4.9** Matrice comparativa dei sistemi tecnologici di raffrescamento passivo nei casi studio analizzati (famiglia SI). Fonte: K. Mitrik

[illegible]

#### 4.6.2 Costruzione della matrice comparativa dei sistemi tecnologico-ambientali nei casi studio analizzati

Al fine di sintetizzare e rendere confrontabili i risultati emersi dall'analisi dei quattordici casi studio, è stata elaborata una matrice finale di valutazione comparativa che restituisce il grado complessivo di integrazione dei sistemi tecnologico-ambientali presenti nei progetti analizzati. La matrice deriva dalla sistematizzazione dei dati raccolti nelle matrici precedenti, nelle quali i sistemi sono stati classificati in cinque macro-famiglie: raffrescamento passivo, guadagno solare, ombreggiamento, accumulo termico e sistemi impiantistici. Per ogni caso studio è stata verificata la presenza dei singoli sistemi appartenenti a ciascuna categoria, attribuendo un valore unitario alla loro presenza. I dati sono stati quindi normalizzati in percentuale, calcolando per ogni famiglia il rapporto tra i sistemi presenti e il totale dei sistemi appartenenti alla stessa categoria. Il punteggio finale di ciascun caso studio è stato ottenuto come media delle

**Tabella 4.10** Matrice comparativa dei sistemi tecnologici di raffrescamento passivo nei casi studio analizzati (famiglia PRI 2). Fonte: K. Mitrik

[illegible]

percentuali delle cinque famiglie, permettendo di costruire un indice sintetico di integrazione tecnologico-ambientale ed evitando che categorie con un numero maggiore di sistemi influenzassero in modo sproporzionato il risultato complessivo.

La matrice finale rappresenta quindi uno strumento di sintesi e confronto, utile a evidenziare il livello di complessità tecnologica e il grado di integrazione tra strategie passive e sistemi impiantistici nei progetti analizzati. L'analisi comparativa mostra infatti configurazioni progettuali differenti: alcuni casi presentano un'elevata integrazione tra strategie passive e sistemi impiantistici avanzati, mentre altri adottano soluzioni più essenziali in cui il Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) costituisce il dispositivo principale della strategia bioclimatica.

Nel complesso, i risultati confermano che l'efficacia del TLVS non dipende solo dalle sue caratteristiche tecniche, ma soprattutto dal livello di integrazione con altri sistemi passivi e impiantistici, che contribuiscono a migliorare le prestazioni energetiche e il comfort indoor.

| (%)  | PRA_2                | (%)  | PRI_2                      | (%)  | SI                            | (%)   | Punteggio finale (%) |
|------|----------------------|------|----------------------------|------|-------------------------------|-------|----------------------|
|      | 01 02 03 04 05 06 07 |      | 01 02 03 04 05 06 07 08 09 |      | 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 |       |                      |
| 10,0 |                      | 42,9 |                            | 33,3 |                               | 30,0  | <b>29,4</b>          |
| 30,0 |                      | 42,9 |                            | 33,3 |                               | 60,0  | <b>40,9</b>          |
| 30,0 |                      | 42,9 |                            | 44,4 |                               | 100,0 | <b>52,7</b>          |
| 20,0 |                      | 42,9 |                            | 33,3 |                               | 30,0  | <b>31,4</b>          |
| 10,0 |                      | 42,9 |                            | 22,2 |                               | 50,0  | <b>29,6</b>          |
| 30,0 |                      | 57,1 |                            | 44,4 |                               | 90,0  | <b>53,5</b>          |
| 30,0 |                      | 42,9 |                            | 33,3 |                               | 60,0  | <b>39,4</b>          |
| 10,0 |                      | 28,6 |                            | 33,3 |                               | 50,0  | <b>27,5</b>          |
| 40,0 |                      | 57,1 |                            | 44,4 |                               | 100,0 | <b>60,6</b>          |
| 30,0 |                      | 28,6 |                            | 33,3 |                               | 50,0  | <b>33,0</b>          |
| 30,0 |                      | 42,9 |                            | 22,2 |                               | 50,0  | <b>38,3</b>          |
| 30,0 |                      | 71,4 |                            | 44,4 |                               | 70,0  | <b>53,9</b>          |
| 40,0 |                      | 57,1 |                            | 44,4 |                               | 100,0 | <b>59,1</b>          |
| 30,0 |                      | 57,1 |                            | 44,4 |                               | 100,0 | <b>57,1</b>          |

## References

- Caso studio 1: The Great Hall, Kent College, Hazle McCormack Young LLP  
CIBSE Journal. (n.d.). Chamber Music – The Great Hall, Kent College, Canterbury. <https://www.cibsejournal.com/case-studies/chamber-music/>  
HMY Architects & Interiors UK. (n.d.). The Great Hall, Kent College, Canterbury. R <https://www.hmy.uk.com/projects/the-great-hall-kent-college-canterbury/>  
Kent Design. (n.d.). The Great Hall, Kent College, Canterbury – Developments. <https://www.kentdesign.org/developments/the-great-hall-kent-college-canterbury/>  
Kent College AMS. (n.d.). Technical Specification & Floor Plans – The Great Hall. [https://kentcollegeams.azureedge.net/Technical\\_Specification\\_Floor\\_Plans\\_The\\_Great\\_Hall-670.pdf?version=638447314622370000](https://kentcollegeams.azureedge.net/Technical_Specification_Floor_Plans_The_Great_Hall-670.pdf?version=638447314622370000)  
ctp LLP. (n.d.). The Great Hall, Kent College, Canterbury – Portfolio. <https://ctp-llp.com/portfolio-items/the-great-hall-kent-college-canterbury/>  
RCI News. (2022, October 24). La nuova Great Hall del Kent College di Canterbury. <https://www.rcinews.it/2022/10/24/la-nuova-great-hall-del-kent-college-di-canterbury/>
- Caso studio 2: Ewha Womans University Campus Complex, Dominique Perrault, Seoul, Corea del Sud  
ArchDaily. (2012, May 28). Ewha Womans University / Dominique Perrault Architecture. <https://www.archdaily.com/227874/ewha-womans-university-dominique-perrault-architecture>  
Archidiap. (n.d.). Ewha Womans University. <https://archidiap.com/opera/ewha-womans-university/>  
Archweb. (n.d.). Ewha Womans University. <https://www.archweb.com/gallerie/ewha-womans-university/>  
Area. (n.d.). Ewha Womans University. <https://www.area-arch.it/ewha-womans-university/>  
DongA. (2008, July 3). Ewha Womans University Campus Complex opens to public. <https://www.donga.com/news/Culture/article/all/20080703/8597671/1>  
Divisare. (n.d.). Ewha Womans University – Dominique Perrault Architecture. <https://divisare.com/projects/201254-dominique-perrault-architecture-ewha-womans-university>  
Dominique Perrault Architecture. (n.d.). Ewha Womans University. [https://www.perraultarchitecture.com/en/projects/2459-ewha\\_womans\\_university.html](https://www.perraultarchitecture.com/en/projects/2459-ewha_womans_university.html)
- Caso studio 3: National Renewable Energy Laboratory (NREL), RNL Design, Golden, CO, Stati Uniti  
Stantec. (n.d.). National Renewable Energy Laboratory Research Facility. Stantec. <https://www.stantec.com/en/projects/united-states-projects/n/national-renewable-energy-laboratory-research-facility>  
Stantec. (2020, August 19). From the Design Quarterly: Looking back on the first large-scale net zero

energy building. Stantec. <https://www.stantec.com/en/ideas/content/blog/2020/from-the-design-quarterly-looking-back-on-the-first-large-scale-net-zero-energy-building>

Sustainable Sites Initiative. (n.d.). National Renewable Energy Lab (NREL) Research Support Facility. Sustainable Sites Initiative. <https://www.sustainablesites.org/national-renewable-energy-lab-nrel-research-support-facility>

Pless, S., & Torcellini, P. (2010). Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options (NREL/TP-550-44586). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/51742.pdf>

Arch2O. (2012, May 9). The Research Support Facility / RNL Design. Arch2O. <https://www.arch2o.com/the-research-support-facility-rnl-design/>

New Buildings Institute. (2017). Radiant heating and cooling: The NREL Research Support Facility. New Buildings Institute. [https://newbuildings.org/wp-content/uploads/2017/09/Radiant\\_NREL\\_FI-NAL.pdf](https://newbuildings.org/wp-content/uploads/2017/09/Radiant_NREL_FI-NAL.pdf)

U.S. Energy Association. (2011). NREL Overview. U.S. Energy Association. <https://usea.org/sites/default/files/event-/2.2%20Steffel%20PEPCO%20-%20NREL%20Overview.pdf>

JE Dunn Construction. (n.d.). National Renewable Energy Laboratory Energy Systems Integration Facility. JE Dunn. <https://jedunn.com/projects/national-renewable-energy-laboratory-energy-systems-integration-facility/>

Efficient Windows Collaborative. (2022). NREL RSF: Road to Net Zero. Efficient Windows. [https://efficientwindows.org/wp-content/uploads/2022/05/NREL\\_RS-F-Road-to-Net-Zero.pdf](https://efficientwindows.org/wp-content/uploads/2022/05/NREL_RS-F-Road-to-Net-Zero.pdf)

Caso studio 4: Planet Earth Gallery, Feilden Clegg Bradley Studios, Doncaster, Regno Unito

AtelierteRn. (n.d.). The Earth Centre Galleries. AtelierteRn. <https://www.atelierten.com/projects/the-earth-centre-galleries>

Feilden Clegg Bradley Studios. (n.d.). Solar Canopy – The Earth Centre. FCB Studios. <https://fcbstudios.com/projects/solar-canopy-the-earth-centre/>

Grant Associates. (n.d.). Earth Centre. Grant Associates UK. <https://grant-associates.uk.com/projects/earth-centre>

The Twentieth Century Society. (2019, November 27). Earth Centre, Conisbrough, South Yorkshire. C20 Society. <https://c20society.org.uk/building-of-the-month/earth-centre-conisbrough-south-yorkshire>

Caso studio 5: Nanaimo Regional General Hospital, Stantec, Isola di Vancouver, Canada

CIBSE Journal. (2019, January). ASHRAE conference: Cooling seminars. Chartered Institution of Building Services Engineers. <https://www.cibsejournal.com/technical/ashrae-conference-cooling-seminars/>

Green Healthcare. (2019). Resiliency profile: Nanaimo Regional General Hospital. Greenhealthcare.ca. <https://greenhealthcare.ca/resiliency/images/publications/2-Resiliency-Profile-Nanaimo.pdf>

Municipal Finance Authority of British Columbia. (2024). Case study: Nanaimo Regional General Hospital. MFA BC. [https://mfa.bc.ca/sites/default/files/Investors/mfabc\\_-\\_ngrh\\_case\\_study\\_-\\_2024.pdf](https://mfa.bc.ca/sites/default/files/Investors/mfabc_-_ngrh_case_study_-_2024.pdf)

Naturally Wood. (n.d.). Nanaimo Regional General Hospital Emergency Department. Naturally: Wood. <https://www.naturallywood.com/projects/nanaimo-regional-general-hospital-emergency-department/>



Government of British Columbia. (2019). Climate action case study: Nanaimo General Hospital. Government of BC. [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/climate-change/cng/resources/case-studies/casestudy\\_nanaimo-gen-hospital.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/climate-change/cng/resources/case-studies/casestudy_nanaimo-gen-hospital.pdf)

Caso studio 6: Sede centrale Turkish Contractors Association (TMB), AVCI ARCHITECTS, Ankara, Turchia  
AtelierteRn. (n.d.). TMB Headquarters. AtelierteRn. <https://www.atelierten.com/projects/tmb-headquarters/>  
Avci Architects. (n.d.). TMB Headquarters Building. Avci Architects. <https://avciarchitects.com/en/projects/tmb-headquarters-building/>  
Avci Architects. (2013, March 7). The Labyrinth Segment in Turkish Contractors Association Building Construction Is Completed, Ankara, Çankaya. Avci Architects. <https://avciarchitects.com/turkiye-muteahhitler-birligi-insaatindan-gelismeler-2/>  
Turkish Contractors Association. (n.d.). Labyrinth System. Turkish Contractors Association. <https://www.tmb.org.tr/en/p/606588f24e2c483e72ff8f9f/labyrinth-system>  
Turkish Contractors Association. (n.d.). Facts & Figures for TCA HQ. Turkish Contractors Association. <https://www.tmb.org.tr/en/p/606589634e2c483e72ff8fa5/facts-figures-for-tca-hq>  
Rethinking The Future. (n.d.). TMB Headquarters by Avci Architects. Rethinking The Future. <https://www.re-thinkingthefuture.com/office-buildings/tmb-headquarters-by-avci-architects/>  
Inhabitat. (2015, May 1). LEED-certified TMB Headquarters raises the bar for the construction industry – Avci Architects TMB. Inhabitat. <https://inhabitat.com/leed-certified-tmb-headquarters-raises-the-bar-for-the-construction-industry/avci-architects-tmb-1>

Caso studio 7: Big Data Institute (BDI) dell'Università di Oxford, Make Architects, Oxford, Regno Unito  
Make Architects. (2017). Big Data Institute, University of Oxford. Make Architects. <https://www.makearchitects.com/projects/the-big-data-institute/>  
Make Architects. (2017). Exploring Thermal Labyrinth Ventilation Systems: Big Data Institute, University of Oxford. Make Architects. <https://www.makearchitects.com/thinking/exploring-thermal-labyrinth-ventilation-systems-big-data-institute-university-of-oxford/>  
RCI News. (2024, September 2). Come utilizzare la struttura in cemento per raffrescare e ventilare. RCI News. <https://www.rcinews.it/2024/09/02/come-utilizzare-la-struttura-in-cemento-per-raffrescare-e-ventilare>  
On Greening. (n.d.). Big Data Institute. On Greening. <https://ongreening.com/en/Projects/big-data-institute-1275>  
WJGL. (n.d.). Big Data Institute, Oxford. WJGL. <https://wjgl.com/featured-projects/big-data-institute-oxford/>  
ArchDaily. (2014, January 13). Big Data Institute revealed for University of Oxford. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/536258/big-data-institute-revealed-for-university-of-oxford>

Caso studio 8: Museo commemorativo di Biggin Hill, Robin Lee Architecture, Bromley, Regno Unito  
Robin Lee Architecture. (n.d.). Biggin Hill Memorial Museum. <https://www.robinleearchitecture.com/projects/carrer-de-mari-cubi-hycym>  
Ritchie Daffin. (2019, January 30). Biggin Hill Memorial Museum Opens. <https://ritchiedaffin.com/>

news/biggin-hill-memorial-museum-opens

BBC News. (n.d.). RAF Biggin Hill Museum Opens (UK) [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=PgmF2C5ayJM>

Artform Urban. (2020, April 6). Project News: Biggin Hill Memorial Museum.

<https://www.artformurban.co.uk/news/post/project-news-biggin-hill-memorial-museum.html>

Caso studio 9: Unisphere, EwingCole + Atelier ten, Silver Spring, MD, Stati Uniti

Atelier Ten. (n.d.). Unisphere. <https://www.atelierten.com/projects/unisphere/>

EwingCole. (n.d.). Unisphere. [https://www.ewingcole.com/portfolio\\_page/unisphere/](https://www.ewingcole.com/portfolio_page/unisphere/)

Architizer. (n.d.). Unisphere. <https://architizer.com/projects/unisphere/>

Architect Magazine. (2018, October 15). Unisphere. [https://www.architectmagazine.com/project-gallery/unisphere\\_o](https://www.architectmagazine.com/project-gallery/unisphere_o)

United Therapeutics. (n.d.). Unisphere sustainability. <https://www.utunisphere.com/sustainability/>

Quartz. (2019, December 19). The innovative design of one of the world's largest net zero buildings.

<https://qz.com/1771906/the-innovative-design-of-one-of-the-worlds-largest-net-zero-buildings>

United Therapeutics. (n.d.). Sustainable facilities overview. <https://corporateresponsibility.unither.com/~media/Files/U/Unither-Corp/reports-and-resources/ut-sustainable-facilities-overview.pdf>

Caso studio 10: Federation Square, Bates Smart e LAB Architecture Studio, Melbourne, Australia

AIRAH. (2008). Thermal energy systems — what you need to know (HVAC&R Nation, Sept.

2008). [https://airah.org.au/Common/Uploaded%20files/Archive/HVACR\\_Nation/2008/HVACRNation\\_2008-09-F02.pdf](https://airah.org.au/Common/Uploaded%20files/Archive/HVACR_Nation/2008/HVACRNation_2008-09-F02.pdf)

AIRAH. (n.d.). 100 Faces: Federation Square. <https://www.airah100.org.au/faces-42.html>

Atelier Ten. (n.d.). Federation Square. <https://www.atelierten.com/projects/federation-square/>

Ecolibrium. (2023, July 1). Critical Mass. <https://theecolibrium.com/2023/07/01/critical-mass/>

pzarch14. (2012, November 7). Concrete Labyrinth | Federation Square, Australia. <https://pzarch14.wordpress.com/2012/11/07/concrete-labyrinth-federation-square-australia/>

Architecture & Design. (n.d.). Integrating HVAC systems in design maximizes efficiency (articolo su Federation Square). <https://www.architectureanddesign.com.au/news/bpn/product-reviews/integrating-hvac-systems-in-design-maximizes-effic>

YouTube – Fed Square. (n.d.). This 1.6 km Underground Labyrinth Has an Unusual Purpose. <https://www.youtube.com/watch?v=vBWYe99ERqM>

YouTube – Fed Square. (n.d.). The underground maze beneath Fed Square. <https://www.youtube.com/watch?v=6makrm2bzSk>

Caso studio 11: Alpine House, Royal Botanic Gardens, Kew, Wilkinson Eyre Architects, Richmond, Regno Unito

Royal Botanic Gardens, Kew. (n.d.). Davies Alpine House. <https://www.kew.org/kew-gardens/whats-in-the-gardens/davies-alpine-house>

"Davies' Alpine House: Environment". (n.d.). Davies Alpine House Weebly. <https://daviesalpinehouse.weebly.com/environment.html>

"Alpine Houses of Kew – Wilkinson Eyre & Atelier Ten". (2007, April 16). European Urban and Regional Policy. Wiley Online Library. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467->

8748.2007.00563.x

Building. (2006, April 20). The project: Davies Alpine House at Kew Gardens. <https://www.building.co.uk/the-project/3066282.article>

Caso studio 12: Surry Hills Library and Community Centre, FJMT, Sydney, Australia

ArchDaily. (2010, April 25). Surry Hills Library and Community Centre / FJMT. <https://www.archdaily.com/57339/surry-hills-library-and-community-centre-fjmt>

ArchitectureAU – Mackenzie, D. (2010, March 10). Surry Hills Library and Community Centre — so how does it work? <https://architectureau.com/articles/surry-hills-so-how-does-it-work/>

ArchitectureAU – Harding, L. (2010, March 10). Surry Hills Library and Community Centre. <https://architectureau.com/articles/surry-hills-library-and-community-centre/>

Decor Systems. (2021, July 12). Green Case Study – Surry Hills Library & Community Centre. <https://decorsystems.com.au/resources/green-case-study-surry-hills-community-centre/>

Ecolibrium (AIRAH). (2011, February). Clear vision. [https://airah.org.au/Common/Uploaded%20files/Archive/Ecolibrium/2011/2011\\_02\\_F03.pdf](https://airah.org.au/Common/Uploaded%20files/Archive/Ecolibrium/2011/2011_02_F03.pdf)

Inhabitat. (2010, November 1). Australia's Surry Hills Library Sets New Standard for Green Design. <https://inhabitat.com/surry-hills-library-community-centre-australias-new-standard-of-sustainable-excellence/>

Archiseek. (2013, December 21). 2009 – Surry Hills Library, Sydney, Australia. <https://www.archiseek.com/2009-surry-hills-library-sydney-australia/>

Group DLA. (n.d.). Surry Hills Library & Community Centre. <https://www.groupdla.com.au/project/surry-hills-community/>

Caso studio 13

[https://www.rug.nl/groundbreakingwork/projects/eae/logbook\\_eae?lang=en](https://www.rug.nl/groundbreakingwork/projects/eae/logbook_eae?lang=en)

[https://www.archdaily.com/891205/energy-academy-europe-broekbakema-plus-de-unie-architecten?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/891205/energy-academy-europe-broekbakema-plus-de-unie-architecten?ad_medium=gallery)

<https://www.rug.nl/society-business/energy/collaboration/energy-academy-europe-magazine-rug-en.pdf>

<https://www.youtube.com/watch?v=78uofZUq2Og>

<http://broekbakema.nl/en/projecten/energy-academy-europe-2/>

<https://www.deuniearchitecten.nl/projecten/energy-academy-europe/>

Caso studio 14

<https://www.uponor.com/en-en/r/posco-green-building>

<https://newsroom.posco.com/en/future-oriented-environment-friendly-architecture-posco-green-building-completed/>

<https://blog.naver.com/oakwoodpr/220067401273>

<https://www.mdpi.com/1996-1073/9/8/599>

<https://www.xismdesign.com/en/work/posco-green-building>

<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201700007248>

<https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201700007248&dbt=TRKO&r>

n=&page=67

<https://namu.wiki/w/%EC%97%B0%EC%84%B8%EB%8C%80%ED%95%99%EA%B5%90/%EA%B5%AD%EC%A0%9C%EC%BA%A0%ED%8D%BC%EC%8A%A4?uuid=f95ec787-fa9d-4b5e-b3ab-ec2a4c86b5fa>

<https://www.kharn.kr/news/article.html?no=4730>

<https://www.newsprime.co.kr/news/article/?no=271190>

<https://www.ekoreanews.co.kr/news/articleView.html?idxno=3127>

[https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2762?utm\\_source=researchgate.net&utm\\_medium=article](https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2762?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article)

#### *ABSTRACT (INGLESE)*

*Chapter 5 concludes the theoretical and experimental pathway by translating the system from a performance-based concept into a concretely designable and implementable solution. In continuity with the physical framework outlined in Chapter 3 and the empirical evidence presented in Chapter 4, the focus shifts to the technological, regulatory, and market dimensions, addressing a recurring gap in the literature: the lack of a systematic organization of the building and mechanical components required for its implementation. The TLVS is conceived as a non-standardized system, not comparable to a pre-assembled industrial product, but rather configurable as a “custom” solution whose effectiveness depends on the coherent integration of passive, active, and hybrid elements. From this perspective, energy performance cannot be attributed to individual devices; instead, it emerges from the interaction between built mass, thermo-fluid dynamic processes, and control strategies. The research develops an operational methodology for the selection and evaluation of products currently available on the market. While the fundamental system components remain unchanged, products continuously evolve through technological improvements; therefore, the analysis focuses on existing market solutions in order to assess their efficiency and applicability. The methodology is grounded in a dual regulatory framework: UNI 8290-1:1981 for the technological classification of building units, and UNI 8289:1981 for performance evaluation according to requirement classes. The decomposition of the TLVS into functional subsystems, air intake, thermal labyrinth, heat exchange surfaces, filtration, below-ground barriers, and monitoring, makes it possible to frame heterogeneous solutions within a shared and comparable technical language. The central contribution of the chapter lies in the cataloguing of products for system components and in the development of a comparative evaluation model integrating technical parameters, regulatory requirements, and sustainability criteria. The analyses show that overall performance is highly sensitive to variables such as pressure losses, surface roughness, hygrothermal stability, and continuity of protective barriers. Components characterized by low fluid dynamic resistance and high aerodynamic permeability prove crucial in maximizing system efficiency and reducing the energy consumption of active devices. The research output includes product data sheets and a comparative performance matrix-operational tools that convert theoretical analysis into decision-making support, integrating technological choices into the overall bioclimatic design strategy.*

## ANALISI DI MERCATO: Classificazione e analisi dei prodotti costitutivi del TLVS

### ABSTRACT

Il Capitolo 5 conclude il percorso teorico e sperimentale traducendo il sistema da concetto prestazionale a sistema concretamente progettuale e realizzabile. In continuità con il quadro fisico delineato nel Capitolo 3 e con le evidenze empiriche emerse nel Capitolo 4, l'attenzione si concentra sulla dimensione tecnologica, normativa e di mercato, colmando una lacuna ricorrente nella letteratura: l'assenza di una sistematizzazione delle componenti edilizie e impiantistiche necessarie alla sua implementazione. Il TLVS è assunto come sistema non standardizzato, non assimilabile a un prodotto industriale preassemblato, ma configurabile come soluzione "*custom*" la cui efficacia dipende dall'integrazione coerente di elementi passivi, attivi e ibridi. In questa prospettiva, la prestazione energetica non è attribuibile a singoli dispositivi, bensì emerge dall'interazione tra massa costruita, dinamiche termo-fluidodinamiche e strategie di controllo. La ricerca sviluppa una metodologia operativa per la selezione e valutazione dei prodotti disponibili sul mercato (pur mantenendo invariata la componentistica di base, i prodotti si evolvono attraverso continui miglioramenti tecnologici. L'analisi dei prodotti, pertanto, si concentra sulle soluzioni attualmente disponibili sul mercato, al fine di valutarne l'efficienza e l'adeguatezza applicativa), fondata su un doppio riferimento normativo: la UNI 8290-1:1981, per la classificazione tecnologica delle unità edilizie, e la UNI 8289:1981, per la valutazione prestazionale secondo classi di esigenza. La scomposizione del TLVS in sottosistemi funzionali, presa d'aria, labirinto termico, superfici di scambio, filtrazione, barriere controterra e monitoraggio, consente di ricondurre soluzioni eterogenee a un linguaggio tecnico condiviso e comparabile. Il contributo centrale del capitolo è la schedatura dei prodotti per la componentistica e la costruzione di un modello valutativo comparativo che integra parametri tecnici, requisiti normativi e criteri di sostenibilità. Le analisi mostrano come la prestazione complessiva sia sensibile a variabili quali perdite di carico, rugosità superficiale, stabilità igrotermica e continuità delle barriere. Componenti a bassa resistenza fluidodinamica e alta permeabilità aerodinamica risultano determinanti per massimizzare l'efficienza e ridurre i consumi dei dispositivi attivi. L'Output della ricerca è la formalizzazione di schede di prodotto e di una matrice di confronto prestazionale, strumenti operativi che trasformano l'analisi teorica in supporto decisionale, integrando la selezione tecnologica nella strategia bioclimatica complessiva.



Sistemi di raffrescamento passivi basati sulla ventilazione per edifici destinati ad usi terziari nel clima mediterraneo  
p. 308

## 5.1 Sistematizzazione tecnico-prestazionale e analisi della componentistica del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS)

Il sistema analizzato rappresenta una strategia di ventilazione passiva e di pretrattamento termico dell'aria che non si configura come un prodotto commerciale standard, ma come un sistema progettuale integrato. Secondo Song et al. (2012), a differenza di altri dispositivi di ventilazione sotterranea o di scambio geotermico – come gli Earth-to-Air Heat Exchangers (EAHE) – il TLVS viene progettato e realizzato ad hoc per ciascun edificio, adattandosi alle sue caratteristiche geometriche, strutturali e funzionali (S.-Y. Song et al., 2012). La natura costruttiva del TLVS fa sì che non esista sul mercato un prodotto unificato o preassemblato, ma una pluralità di componenti e soluzioni tecniche da combinare in fase progettuale. Ogni applicazione risulta pertanto unica, in quanto dipende da variabili quali il clima locale, le condizioni del suolo, i vincoli spaziali, i requisiti di ventilazione e le prestazioni energetiche richieste. Studi sperimentali confermano che la configurazione geometrica del labirinto, la velocità dell'aria e la conduttività termica dei materiali determinano in modo diretto l'efficienza complessiva del sistema (Marmion et al., 2012; Rim et al., 2018).

Le applicazioni reali riportate in letteratura e nei casi di studio, come la Federation Square di Melbourne, il Municipal Theatre di Heilbronn in Germania o l'Ewha Womans University Campus Complex in Seoul, Corea del Sud (Capitolo 4, § 4.3), evidenziano la natura "custom" del TLVS: in ciascun caso, il labirinto viene integrato nella struttura edilizia, corredato da sensori, controlli e connessioni dirette con le Air Handling Units (AHU) o con sistemi ibridi di ventilazione naturale e meccanica (McGowan, 2013).

Ad oggi, tuttavia, non esiste una sintesi unitaria delle componenti che definiscono un TLVS. La maggior parte della letteratura si concentra sugli aspetti prestazionali ed energetici, come la riduzione dei carichi termici e la dinamica stagionale del sistema (S. Song et al., 2014), mentre risultano assenti riferimenti sistematici alla componentistica edilizia e impiantistica necessaria per la sua realizzazione.

Il presente capitolo intende quindi colmare tale lacuna, avviando

un percorso di sistematizzazione e valutazione tecnica articolato in quattro fasi principali:

Analisi della componentistica del sistema TLVS, con individuazione dei sottosistemi funzionali (presa d'aria, labirinto termico, massa di accumulo, drenaggi, controllo e gestione, etc);

Raccolta e catalogazione dei prodotti disponibili sul mercato, organizzati secondo le classi di unità tecnologiche della norma UNI 8290-1:1981, al fine di costruire una base dati coerente e confrontabile;

Valutazione critica delle informazioni tecniche relative ai prodotti individuati, condotta attraverso le classi di esigenza della norma UNI 8289:1981 (Sicurezza, Benessere, Fruibilità, Aspetto, Gestione, Integrabilità e Salvaguardia dell'ambiente), con attribuzione di valutazioni qualitative da 0 a 5 mediante apposite schede di analisi.

Schedatura dei prodotti: a partire dai prodotti raccolti e catalogati nei file excel, si avvia la fase di valutazione qualitativa mediante schede di analisi dedicate.

Tale metodologia consente di costruire un quadro operativo che, partendo dai risultati scientifici disponibili, possa supportare la progettazione e la selezione delle componenti di un TLVS coerente con il contesto edilizio e climatico di riferimento.

## 5.2 Componentistica attiva, passiva ed ibrida del TLVS

Il TLVS rappresenta un sistema integrato in cui componenti edilizie passive e dispositivi impiantistici attivi cooperano per garantire la regolazione termo-igrometrica e la qualità dell'aria di ventilazione. Tale sinergia, più che una distinzione netta, costituisce un continuum tecnologico tra architettura e impianto, in cui la materia costruita diviene essa stessa parte del sistema di climatizzazione. Dalla letteratura e dai casi di studio sono risultati i seguenti pacchetti di componenti :

### 1. Presa d'aria esterna / Torre di aspirazione

- Struttura metallica o in c.a. prefabbricato con griglie e serrande di regolazione
- Filtro antipolvere e rete anti-insetto
- Serrande motorizzate di regolazione portata
- Sensori di temperatura e umidità in ingresso

### 2. Massa termica / Labirinto

- Pareti verticali in c.a. o in blocchi prefabbricati
- Solai superiori/interrati e platee a contatto con il terreno
- Canali di distribuzione e interconnessione
- Setti o superfici con texture e rilievi superficiali (matrici)
- Rivestimenti superficiali con additivi ad alta conducibilità termica o basso IR
- Sistemi di drenaggio e impermeabilizzazione (EPDM, HDPE, guaine bituminose)

### 3. Sistema di filtraggio e trattamento aria

- Moduli filtranti (HEPA, carboni attivi, etc)
- Ventilatori e condotti di distribuzione in acciaio o alluminio
- Sistema di by-pass stagionale o di free cooling
- Unità di controllo portata e pressione

### 4. Barriere e sistemi di protezione

- Membrane anti-radon e anti-umidità (HDPE, bituminose o EPDM)
- Drenaggi e canaline per la raccolta condense o acque di infiltrazio-

ne

- Barriere termiche e acustiche tra labirinto e locali tecnici

#### 5. Sistema di controllo e monitoraggio

- Sensori di temperatura, umidità, velocità aria, CO<sub>2</sub>
- PLC o sistema BMS per gestione automatizzata dei flussi (day/night, purge mode)
- Attuatori su serrande e ventilatori

#### 6. Interfaccia con impianto di climatizzazione (AHU)

- Centrale di trattamento aria (CTA)
- Condotti di mandata e ripresa collegati al labirinto
- Sistema di deumidificazione / pretrattamento

#### 7. Accessi e manutenzione

- Botole, vani tecnici, passerelle per ispezione e pulizia
- Sistemi di illuminazione e segnalazione interna al labirinto
- Trattamenti anti-muffa e antimicrobici sulle superfici interne

### 5.1.1 Componenti passivi del sistema TLVS

In termini generali, la componente passiva del TLVS è costituita dal volume labirintico – un insieme di setti, pareti e pavimentazioni in calcestruzzo o muratura. Durante le ore notturne, l'aria fresca attraversa i canali del labirinto raffreddando la massa muraria, che a sua volta restituisce il calore accumulato nelle ore diurne. Nella stagione invernale, il processo si inverte: l'inerzia termica delle strutture consente un pre-riscaldamento naturale dell'aria in ingresso.

Le componenti passive comprendono dunque tutte quelle unità tecnologiche edilizie che operano senza l'ausilio di energia meccanica: -setti e le pareti portanti in calcestruzzo armato o prefabbricato, caratterizzati da elevata capacità termica e bassa emissività infrarossa;

- chiusure orizzontali (platee, solai controterra o interrati) che contribuiscono alla stabilizzazione termica mediante contatto diretto con il suolo;

- superfici interne trattate con texture e rilievi (ottenuti tramite matrici in poliuretano o silicone) che aumentano l'area di scambio e favoriscono la turbolenza del flusso d'aria;

- rivestimenti protettivi e le barriere anti-radon in HDPE, EPDM o bitume polimerico, che assicurano la tenuta all'umidità e ai gas del terreno.

### 5.1.2 Componenti attiva del sistema TLVS

Parallelamente, il sistema è completato da una serie di componenti attive, indispensabili per garantire il funzionamento controllato, la regolazione della portata e l'interfaccia con i sistemi HVAC dell'edificio. Tali elementi, appartenenti prevalentemente alla classe 3.5 – Impianti di fornitura servizi della norma UNI 8290, includono:

- ventilatori di mandata e di espulsione, che assicurano il flusso d'aria forzato nei periodi in cui la ventilazione naturale non è sufficiente;
- moduli filtranti (HEPA, F7–F9, carboni attivi) e le unità di pre-trattamento dell'aria, finalizzati alla rimozione di polveri, particolato e contaminanti;
- le serrande e valvole motorizzate, che permettono la regolazione dei flussi, il funzionamento in modalità purge notturna o free-cooling diurna e la gestione del by-pass stagionale;
- interfacce con le centrali di trattamento aria (AHU) o con impianti ibridi di climatizzazione, per l'integrazione del TLVS in sistemi più complessi di ventilazione e recupero energetico;
- sensori ambientali di temperatura, umidità e CO<sub>2</sub>, connessi a sistemi di controllo centralizzati (PLC o BMS) che gestiscono automaticamente il funzionamento del labirinto in base alle condizioni climatiche esterne e ai carichi interni;
- infine, le infrastrutture di ispezione e manutenzione, costituite da botole di accesso, passerelle e sistemi di illuminazione tecnica per consentire operazioni periodiche di pulizia e verifica.

Le componenti attive, pur costituendo una percentuale ridotta del sistema in termini volumetrici, rivestono un ruolo determinante nel garantire la flessibilità operativa e la stabilità delle prestazioni. Grazie al controllo automatico, il TLVS può infatti operare in modalità differenti (raffrescamento notturno, pre-riscaldamento invernale, ventilazione naturale o meccanica ibrida), adattandosi ai regimi climatici e alle esigenze d'uso dell'edificio.

In conclusione, il TLVS si configura come un sistema ibrido nel quale elementi passivi e attivi sono strettamente integrati: le strutture edilizie forniscono la massa termica e la funzione di scambio, mentre i dispositivi impiantistici attivi ne ottimizzano l'efficacia e la gestione.

### 5.1.3 Scelta delle componenti: Il ruolo dei sistemi passivi nella strategia bioclimatica del TLVS

Le analisi successive si concentrano sulle componenti passive del



TLVS, poiché rappresentano il fondamento bioclimatico del sistema: nei modelli di architettura bioclimatica i meccanismi dell'inerzia termica, della ventilazione naturale e del posizionamento costruttivo svolgono un ruolo primario nella qualità ambientale e nell'efficienza energetica (De Toldi et al., 2022; Toroxel et al., 2024). Le componenti attive, pur essenziali per la regolazione, sono interpretate come supporto operativo e non oggetto principale dell'indagine.

Questa scelta metodologica è motivata da diverse ragioni:  
Centralità del principio passivo – il TLVS nasce come evoluzione dei sistemi di ventilazione naturale e di scambio con la massa termica del suolo, concepito per sfruttare le proprietà fisiche dell'involucro edilizio e dei materiali, prima ancora che i meccanismi impiantistici di controllo (Song, 2012; Bahar, Jenkins & Menzies, 2013).

Ruolo architettonico-costruttivo – le componenti passive (setti, solette, texture, barriere, masse termiche) costituiscono parte integrante della struttura dell'edificio, e dunque rappresentano il livello su cui il progettista architettonico può intervenire in modo diretto, definendo morfologia, materiali e prestazioni.

Obiettivo di ricerca – l'indagine mira a costruire una mappatura dei prodotti edilizi e dei materiali che possono costituire la massa termica e le superfici di scambio del TLVS, classificandoli secondo la UNI 8290 e valutandone le prestazioni con le classi di esigenza della UNI 8289. Tale approccio risponde alla necessità di creare una base di conoscenza utile alla progettazione e alla replicabilità del sistema, più che alla gestione impiantistica.

Complementarità con la letteratura esistente – gli studi analizzati si concentrano principalmente sugli aspetti fluidodinamici e di controllo attivo del sistema (ventilazione meccanica, automazione, sensori, BMS), mentre manca una sistematizzazione del contributo edilizio passivo alla prestazione globale. Il presente lavoro si propone quindi di colmare tale lacuna, offrendo una lettura tecnologica e materica del TLVS.

## 5.3 Classificazione tecnologica del TLVS secondo la UNI 8290-1:1981

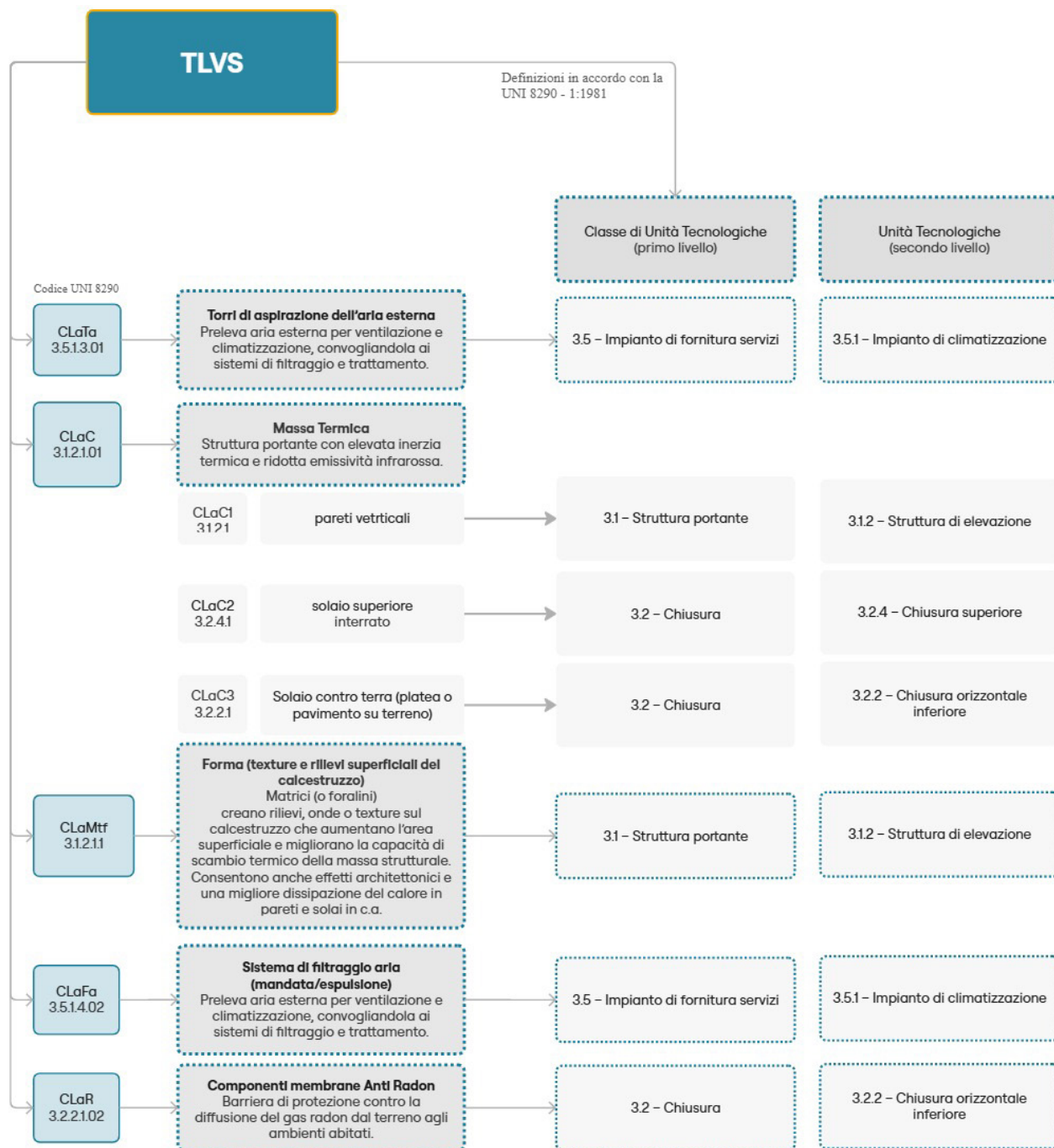
La complessità del sistema richiede una classificazione coerente con il linguaggio tecnico del sistema edilizio. A tale scopo, si è fatto riferimento alla norma UNI 8290-1:1981, che definisce la suddivisione dell'edificio in sistemi, sottosistemi e componenti tecnologiche secondo criteri funzionali, prestazionali e costruttivi. Lo schema riportato in figura [fig. XX] sintetizza tale processo di classificazione, articolando il TLVS in relazione alle tre gerarchie previste dalla norma:

- Classe di Unità Tecnologiche (primo livello), che individua la funzione generale (struttura, chiusure, impianti di fornitura servizi);
- Unità Tecnologiche (secondo livello), che definiscono i sottosistemi specifici (struttura portante, chiusura superiore, impianto di climatizzazione, ecc.);
- Classi di Elementi Tecnici (terzo livello), che rappresentano gli elementi costruttivi puntuali (pareti, solai, filtri, membrane, ecc.).

Questa griglia consente di collocare ciascuna componente del TLVS all'interno del sistema edilizio complessivo, favorendo il dialogo tra discipline architettoniche, strutturali e impiantistiche.

Da un punto di vista funzionale, il TLVS si colloca prioritariamente nella Classe 3 – Impianto di fornitura servizi, e in particolare all'interno della Unità Tecnologica 3.5.1 – Impianto di climatizzazione, poiché contribuisce in modo diretto alla regolazione termo-igrometrica e alla ventilazione dell'edificio (*Tabella 5.1*). Anche se il sistema opera in modo passivo, esso è concepito per assolvere funzioni tipicamente riconducibili all'impiantistica, come lo scambio termico con l'aria, il differimento dei picchi termici e la ventilazione differenziale tra ambienti interni ed esterni. Questo posizionamento è rafforzato dalla possibilità di integrazione del TLVS con dispositivi di filtraggio, canalizzazione o sensoristica, che ne estendono le prestazioni all'ambito della qualità dell'aria indoor.

Parallelamente, il TLVS possiede una componente materica e costruttiva – data dalla sua struttura massiva (blocchi prefabbricati,



*Schema 5.1 Schema delle unità tecnologiche e dei componenti del sistema TLVS, con classificazione secondo UNI 8290 e articolazione tra elementi, materiali e funzioni prestazionali.  
Fonte: K. Mitrik*

| Classi di elementi tecnici<br>(terzo livello)                                           | Elementi Tecnici                                     | Componente tipica                                                              | Materiale                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3.5.1.3 – Centrali di trattamento fluidi                                                | Torre di aspirazione / presa d'aria esterna          | Torre metallica o in CLS con griglie e serrande di regolazione                 | Acciaio zincato, alluminio, eventualmente calcestruzzo prefabbricato                                                                 |
| 3.1.2.1 – Strutture verticali                                                           | Parete/setto portante in c.a. o muratura strutturale | Parete piena ad elevata massa                                                  | Calcestruzzo "miscela basso emissivo" (additivi/finiture a bassa emissività); Blocchi prefabbricati in cls (vibrocompressi / armati) |
| 3.2.4.1 – Coperture                                                                     | Solaio interpiano o copertura su interrato           | Soletta orizzontale in c.a. con isolamento e guaina                            | Calcestruzzo "miscela basso emissivo" come strato strutturale; Elementi prefabbricati in cls come piastra/platea modulare            |
| 3.2.2.1 – Solai a terra                                                                 | Pavimento controterra o platea di fondazione         | Soletta in c.a. su vespaio, drenante o barriera al gas                         | Calcestruzzo "miscela basso emissivo" per piastra; Elementi prefabbricati in cls (predalle/travi-pignatte pesanti)                   |
| 3.1.2.1 – Strutture verticali                                                           | Parete o setto in calcestruzzo strutturale a vista   | Matrici, casseri o foralini decorativi e funzionali applicati in fase di getto | Poliuretano, silicone o resina termoidurente (matrici)                                                                               |
| 3.5.1.3 – Centrali di trattamento fluidi<br>3.5.1.4 – Reti di distribuzione e terminali | Modulo filtrante o unità terminale di filtraggio     | Filtri HEPA, F7-F9 o carboni attivi in box o plenum                            | Fibre sintetiche, carboni attivi, acciaio inox o alluminio                                                                           |
| 3.2.2.1 – Solai a terra                                                                 | Membrana di tenuta ai gas e vapore                   | Strato continuo posato sotto platea o pavimento                                | Membrana in HDPE, EPDM o bituminosa polimerica                                                                                       |

labirinti in muratura o calcestruzzo armato, ecc.) – che ne giustifica l'inquadramento anche all'interno della Classe 2 – Elementi dell'edificio, in particolare come Elemento di chiusura verticale o orizzontale (2.1 o 2.2, a seconda della configurazione), poiché concorre alla delimitazione fisica degli spazi e partecipa all'inerzia termica dell'involucro. In questa prospettiva, il TLVS può essere considerato a tutti gli effetti una componente ibrida, ossia una unità tecnico-prestazionale composita, con implicazioni sia sul piano del computo metrico estimativo (per la valutazione economica e la gestione delle fasi esecutive), sia sul piano energetico-ambientale, per l'analisi delle prestazioni passive legate all'accumulo e al rilascio del calore.

#### 5.2.1 Torre di aspirazione dell'aria esterna (CLaTa – 3.5.1.3.01)

Secondo la UNI 8290-1:1981, la torre di aspirazione appartiene alla classe 3.5 – Impianti di fornitura servizi, nell'ambito dell'impianto di climatizzazione. Essa costituisce l'interfaccia tra ambiente esterno e TLVS, con funzione di captazione, filtrazione e convogliamento dell'aria verso i condotti ipogei, limitando l'ingresso di inquinanti e umidità. Realizzata in acciaio, alluminio o calcestruzzo prefabbricato, è dotata di griglie, serrande e sistemi di drenaggio. Deve garantire stabilità, efficienza aerodinamica e durabilità, oltre a una corretta integrazione architettonica. Nel TLVS regola la pressione di ingresso e avvia il ciclo di ventilazione naturale, eventualmente supportato da sistemi meccanici in condizioni critiche.

#### 5.2.2 Massa termica (CLaC – 3.1.2.1.01)

Classificata nella struttura portante (classe 3.1), la massa termica costituisce il nucleo del labirinto. Realizzata in calcestruzzo ad alta inerzia, assorbe e rilascia lentamente il calore dell'aria, contribuendo alla stabilizzazione termica. È composta da pareti verticali, solai superiori e controterra, prefabbricati o gettati in opera, talvolta integrati con strati isolanti o barriere al vapore. Nel TLVS svolge un ruolo centrale nello scambio energetico passivo, riducendo i picchi termici e migliorando l'efficienza complessiva.

#### 5.2.3 Matrice-forma (CLaMtf – 3.1.2.1.11)

Le matrici di formatura, appartenenti alla stessa classe strutturale, sono elementi applicati alle casseforme per definire texture e rugosità del calcestruzzo. Oltre alla valenza estetica, incidono sulle pre-

stazioni termiche, migliorando lo scambio convettivo e radiativo. Realizzate in poliuretano, silicone o resine, consentono di ottenere superfici modellate che aumentano la dissipazione termica. Nel TLVS assumono quindi una funzione sia prestazionale sia percettiva.

#### 5.2.4 Sistema di filtraggio dell'aria (CLaFa – 3.5.1.4.02)

Inserito nell'impianto di climatizzazione (classe 3.5), il sistema di filtraggio ha il compito di trattare e distribuire l'aria, rimuovendo particolato e inquinanti. È composto da filtri (HEPA, F7-F9, carboni attivi) alloggiati in moduli metallici, spesso integrati con sistemi di regolazione e sensori. Questo componente è determinante per la qualità dell'aria e incide direttamente su benessere, igiene e consumi energetici, a causa delle perdite di carico introdotte.

#### 5.2.5 Membrane anti-radon (CLaR – 3.2.2.1.02)

Appartenenti alla classe 3.2 – Chiusura, le membrane anti-radon sono barriere continue poste sotto le fondazioni per impedire la risalita dei gas dal suolo. Realizzate in materiali sintetici o bituminosi (HDPE, EPDM), sono integrate con sistemi di sigillatura e protezione. Nel TLVS svolgono un ruolo fondamentale per la qualità dell'aria e la sicurezza sanitaria, garantendo la continuità della barriera e la durabilità del sistema nel tempo.



## 5.4 Schede dei prodotti: metodologia di raccolta e strutturazione delle informazioni di mercato

La fase di costruzione del database dei prodotti rappresenta un momento metodologico cruciale del percorso di ricerca, in quanto traduce l'analisi teorica e prestazionale del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) in un dispositivo operativo di supporto alla progettazione. Come emerso nei capitoli precedenti, il TLVS non si configura come un prodotto edilizio industrializzato o come un sistema impiantistico preassemblato, ma come una configurazione tecnico-architettonica integrata, la cui efficacia dipende dalla coerenza tra massa termica, geometria spaziale, materiali, componenti di ventilazione e sistemi di controllo.

Tale natura "custom" rende assente una filiera commerciale unitaria e impone la necessità di una sistematizzazione autonoma delle componenti reperibili sul mercato.

La raccolta delle informazioni è stata quindi impostata non come repertorio descrittivo, bensì come processo analitico strutturato, finalizzato a costruire un quadro comparabile e verificabile delle soluzioni tecniche disponibili.

Il punto di partenza è stato la scomposizione funzionale del TLVS nei suoi sottosistemi costitutivi, operazione condotta attraverso l'analisi dei casi studio e della letteratura tecnico-scientifica. Questa scomposizione ha consentito di individuare le macro-funzioni ricorrenti del sistema: accumulo e scambio termico, convogliamento dell'aria, protezione e drenaggio, controllo e gestione impiantistica. A partire da tale articolazione funzionale, si è proceduto alla definizione delle famiglie di prodotto, organizzate in coerenza con la classificazione del sistema edilizio proposta dalla norma UNI 8290. Questa scelta metodologica risponde a una duplice esigenza: da un lato, ricondurre le singole componenti alla logica sistemica dell'edificio; dall'altro, evitare una visione frammentata o esclusivamente impiantistica del TLVS.

Le famiglie individuate – strutture e masse di accumulo (STR), canalizzazioni (CAN), prese e terminali di ventilazione (VNT), sistemi di drenaggio (DRN), materiali ad alta massa (MAT), sistemi di controllo (CTRL) – non rappresentano categorie merceologiche

isolate, ma parti interrelate di un unico organismo tecnologico.

La fase successiva ha riguardato la definizione dei criteri di raccolta delle informazioni. La selezione dei parametri non è stata casuale né meramente descrittiva, ma orientata dagli obiettivi della ricerca e dalle variabili prestazionali identificate nei capitoli precedenti. Sono stati quindi raccolti dati identificativi e di tracciabilità (produttore, codice, provenienza), al fine di garantire verificabilità e replicabilità; dati di classificazione tecnologica, per collocare il prodotto all'interno del sistema edilizio; caratteristiche fisico-meccaniche, indispensabili per valutare compatibilità strutturale e durabilità; caratteristiche termo-igrometriche, determinanti per la funzione di accumulo e scambio termico; informazioni operative relative alla posa, manutenzione e gestione, essenziali per una valutazione di fattibilità applicativa. Particolare attenzione è stata dedicata ai parametri termo-fisici, quali conducibilità termica, densità, calore specifico, permeabilità al vapore e comportamento alle variazioni stagionali. La loro inclusione nel database risponde alla necessità di valutare in modo coerente la capacità delle componenti di contribuire allo smorzamento dell'onda termica e alla stabilizzazione delle condizioni microclimatiche interne, obiettivo primario del TLVS. Il database è stato strutturato in ambiente Excel con una logica relazionale e filtrabile, in modo da consentire confronti tra prodotti appartenenti alla stessa famiglia e analisi incrociate tra requisiti prestazionali e caratteristiche tecniche. Esso non è stato concepito come archivio statico, ma come strumento dinamico di supporto decisionale, funzionale alla costruzione delle matrici comparative e delle schede di valutazione qualitativa. A completamento della raccolta, ogni prodotto è stato analizzato attraverso le classi di esigenza della norma UNI 8289:1981 (Sicurezza, Benessere, Fruibilità, Gestione, Aspetto, Salvaguardia dell'ambiente), attribuendo una valutazione qualitativa su scala graduata. Tale integrazione consente di superare una lettura esclusivamente tecnica o energetica del prodotto, includendo dimensioni gestionali, ambientali e prestazionali in senso ampio. Nel suo complesso, questa procedura metodologica consente di colmare una delle principali lacune evidenziate nella letteratura: l'assenza di una sistematizzazione organica della componentistica necessaria alla realizzazione di un Thermal Labyrinth Ventilation System. La costruzione del database non rappresenta dunque un'operazione accessoria, ma un passaggio strutturante della ricerca, in quanto traduce l'approccio performance-based in uno strumento

operativo replicabile, capace di supportare la selezione consapevole delle componenti in funzione del contesto climatico, delle esigenze energetiche e dei vincoli tipologici dell'edificio.

La struttura del database Excel è stata progettata come dispositivo metodologico di raccolta, organizzazione e valutazione delle informazioni tecniche relative ai prodotti potenzialmente integrabili nel Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS). L'indice delle colonne non rappresenta un semplice elenco descrittivo, ma la traduzione operativa dei requisiti funzionali, prestazionali e normativi individuati nel quadro teorico della ricerca. La costruzione del foglio di lavoro risponde alla necessità di integrare dimensioni eterogenee – tecnologiche, ambientali, fisico-meccaniche, normative ed economiche – in un unico strumento comparativo. La sequenza delle colonne è stata pertanto organizzata secondo una progressione logica che accompagna il prodotto dalla sua identificazione generale fino alla valutazione tecnico-prestazionale e gestionale.

- La prima sezione del database è dedicata all'identificazione e alla tracciabilità del prodotto. Campi quali codice prodotto/componente, elemento, tipo di elemento (prodotto, prototipo, progetto, simulazione), produttore, fornitore, sede di produzione, link e contatti consentono di garantire verificabilità delle fonti e replicabilità dell'analisi. Questa parte del database risponde a un principio di rigore scientifico: ogni informazione deve essere riconducibile a un soggetto produttore e a una documentazione tecnica ufficiale.
- La seconda sezione riguarda l'inquadramento funzionale e applicativo. Le colonne descrizione del prodotto, note, settore di utilizzo, ambiti di applicazione, impieghi e vantaggi (con specificazione di quelli ambientali) permettono di contestualizzare il componente all'interno del sistema edilizio e di evidenziarne la potenziale coerenza con gli obiettivi di sostenibilità della ricerca. In questa fase si è scelto di includere anche un campo relativo alla tecnologia e al grado di innovazione, con particolare attenzione a caratteristiche quali efficienza energetica, riduzione dell'impatto ambientale o integrazione con sistemi intelligenti. Tale scelta riflette l'orientamento della tesi verso un approccio performance-based e verso la valutazione del contributo dei componenti alla transizione energetica.
- La terza sezione del database è dedicata ai parametri dimensionali ed economici, includendo prezzo, dimensioni, spessore, den-

sità, peso, che costituiscono variabili fondamentali per la valutazione della fattibilità costruttiva e dell'impatto strutturale del sistema. L'inclusione di questi dati consente di correlare le prestazioni termo-fisiche con la reale implementabilità del prodotto.

- Una parte centrale dell'indice Excel è dedicata alle caratteristiche termo-fisiche e igrometriche, quali conducibilità termica ( $\lambda$ ), trasmittanza (U), calore specifico, permeabilità al vapore, tenuta all'acqua, resistenza al gelo, stabilità a caldo e coefficiente di trasmissione del radon. La selezione di questi parametri è strettamente coerente con la natura del TLVS come sistema di scambio termico passivo basato sull'inerzia della massa. La loro raccolta consente di valutare in modo oggettivo la capacità dei materiali di contribuire allo smorzamento dell'onda termica e alla stabilizzazione microclimatica.
- Parallelamente, sono stati inclusi parametri di carattere meccanico e prestazionale – quali resistenza meccanica, resistenza a trazione, resistenza alla lacerazione, comportamento al fuoco, resistenza agli agenti chimici – in relazione alle classi di esigenza della norma UNI 8290. Questa integrazione normativa consente di superare una valutazione esclusivamente energetica, includendo requisiti di sicurezza, durabilità e affidabilità strutturale.
- Una ulteriore sezione riguarda le informazioni operative e gestionali: tipologia di fissaggio, distaccante, tempo medio di messa in opera, risorse umane necessarie, modalità di installazione, nonché la sezione dedicata alla comunicazione con il fornitore (richiesta inviata, data risposta, esito). Questa parte del database risponde all'esigenza di integrare la dimensione prestazionale con quella esecutiva e gestionale, elemento determinante nella valutazione della replicabilità del TLVS in contesti reali.

Nel suo complesso, l'indice del database è stato concepito come struttura multilivello capace di connettere:

identificazione e tracciabilità,  
inquadramento funzionale,  
parametri fisico-tecnici,  
requisiti normativi,  
sostenibilità ambientale,  
fattibilità economica e operativa.

(Tabella 5.2).

Fonte: K. Mitrik

[illegible]

#### 5.4.1 Classificazione e sistematizzazione dei prodotti per il sistema TLVS: schede dei prodotti

Il progettista, nel voler integrare un labirinto d'aria in un edificio di nuova costruzione, si trova di fronte a due opzioni principali: da un lato, la possibilità di sviluppare una soluzione su misura, un lavoro più complesso e ambizioso, che richiede un impegno significativo in termini di progettazione e personalizzazione; dall'altro, la scelta di adottare una soluzione standardizzata, rivolgendosi a un'azienda che offre tecnologie industrializzate, con il vantaggio di tempi di realizzazione più rapidi e costi inferiori.

Nel caso in cui il progettista scelga di sviluppare una soluzione personalizzata, il processo di progettazione del labirinto d'aria diventa molto più complesso, ma anche altamente adattato alle esigenze specifiche dell'edificio. Questa opzione prevede una progettazione che tiene conto di vari fattori, come la forma, le dimensioni, il flusso d'aria e l'integrazione con altri sistemi dell'edificio, come il riscaldamento, il raffreddamento e la ventilazione. Tra cui le componenti saranno:

- **Struttura portante:** Il labirinto d'aria può essere costituito da una serie di pareti interne che definiscono i percorsi dell'aria. Queste pareti potrebbero essere realizzate in materiali leggeri ma resistenti.
- **Canali di ventilazione:** L'aria viene fatta circolare attraverso una rete di canali, spesso a forma di serpentina, che si snodano all'interno del labirinto.
- **Sistema di isolamento:** Per garantire l'efficienza energetica, il labirinto d'aria spesso include un sistema di isolamento termico lungo le pareti e i canali, evitando dispersioni di calore o freddo.
- **Filtraggio dell'aria:** L'aria che attraversa il labirinto potrebbe passare attraverso filtri per rimuovere polvere, allergeni e altre impurità, migliorando la qualità dell'aria interna.
- **Controllo e regolazione:** Sistemi di controllo avanzati possono essere inclusi per monitorare e regolare il flusso dell'aria, la temperatura e l'umidità, per adattarsi alle variazioni climatiche e alle necessità dell'edificio.

Questo approccio, pur essendo più impegnativo in termini di progettazione, consente una maggiore personalizzazione del labirinto d'aria in base alle specifiche necessità energetiche e architettoniche dell'edificio.



Nel caso in cui il progettista opti per una soluzione standardizzata, l'idea è di semplificare il processo di progettazione, riducendo tempi e costi grazie all'adozione di un sistema predefinito fornito da un'azienda specializzata. Qui, il progettista si affida a tecnologie industrializzate che sono già progettate per soddisfare determinati standard prestazionali, con meno personalizzazione ma maggiori vantaggi in termini di efficienza e tempi di implementazione. Componenti:

- Modulo preassemblato: Le aziende che offrono soluzioni industrializzate forniscono spesso moduli già preassemblati, che possono essere facilmente integrati nel progetto dell'edificio. Questi moduli includono canali di ventilazione e pareti prefabbricate che si adattano rapidamente allo spazio disponibile.
- Materiali standardizzati: I materiali utilizzati per il labirinto d'aria sono scelti per garantire resistenza, durata e facilità di montaggio.
- Sistema di gestione dell'aria integrato: I sistemi di controllo del flusso dell'aria, della temperatura e dell'umidità sono spesso preconfigurati e facili da integrare con il sistema HVAC dell'edificio. Questi sistemi non richiedono un intervento di progettazione complesso, ma possono essere regolati in base alle necessità specifiche dell'edificio.
- Facilità di installazione: Le soluzioni standardizzate sono progettate per essere facili e rapide da installare, riducendo significativamente i tempi di costruzione. Questo approccio consente una maggiore prevedibilità dei costi e una riduzione degli imprevisti durante il processo di montaggio.

La scelta tra una soluzione su misura e una standardizzata dipende dalle esigenze specifiche del progetto, dalla complessità del sistema di ventilazione e dalle risorse disponibili. La soluzione su misura offre maggiore flessibilità e adattabilità, ma richiede un impegno significativo in termini di progettazione e costi. Al contrario, la soluzione standardizzata permette di ottenere risultati simili in termini di performance, ma con un'implementazione più rapida e meno costosa.

Su questa base, è stato svolto un lavoro di criterio in merito a una selezione di articoli di largo consumo per informazioni di settore con lo scopo di realizzare l'analisi di varietà di tecnologia e scala per i sistemi di raffreddamento mediante ventilazione. Questo compito era rivolto a fare comprendere al progettista le differenze fondamentali che caratterizzano ognuna delle variazioni previste e guidarlo verso la scelta più idonea rispetto alle specifiche esigenze progettuali.

Inoltre, dato il ruolo fondamentale che l'industria ricopre nello

sviluppo di tecnologie utilizzabili per la realizzazione del labirinto d'aria, è considerata indispensabile un'analisi approfondita dei vari sistemi industrializzati attualmente presenti sul mercato. La schedatura dei prodotti è stata realizzata tramite un'analisi di mercato che ha preso in considerazione principalmente il panorama nazionale, sebbene includendo anche quello internazionale. Questo approccio è stato scelto per garantire, successivamente, la possibilità di stabilire un contatto diretto con le aziende e usufruire di spedizioni a km0 per quanto possibile.

Pur mantenendo invariata la componentistica di base, i prodotti si evolvono attraverso continui miglioramenti tecnologici. L'analisi dei prodotti, pertanto, si concentra sulle soluzioni attualmente disponibili sul mercato, al fine di valutarne l'efficienza e l'adeguatezza applicativa (*Tabella 5.2*).

**FAM. 01 – Torre di aspirazione dell'aria**

Codice famiglia: CLaTa – 3.5.1.3.01

Numero prodotti raccolti: n. 5

Numero possibili di schede: n. 4

**FAM. 02 – Massa termica**

Codice famiglia: CLaC – 3.1.2.1.01

Numero schede raccolte: n. 9

Numero possibili di schede: n. 9

**FAM. 03 – Matrice-forma**

Codice famiglia: CLaMtf – 3.1.2.1.11

Numero schede raccolte: n. 4

Numero possibili di schede: n. 4

**FAM. 04 – Sistema di filtraggio dell'aria**

Codice famiglia: CLaFa – 3.5.1.4.02

Numero schede raccolte: n. 6

Numero possibili di schede: n. 5

**FAM. 05 – Membrane anti-radon**

Codice famiglia: CLaR – 3.2.2.1.02

Numero schede raccolte: n. 8

Numero possibili di schede: n. 6

*Tabella 5.2 Classificazione delle famiglie tecnologiche del sistema TLVS, articolate per componenti strutturali, distribuzione dell'aria, terminali di ventilazione, sistemi di drenaggio, materiali ad alta massa termica e dispositivi di controllo e integrazione impiantistica. Fonte: K. Mitrik*

#### 5.4.1.1 Composizione delle schede dei prodotti: scheda n.1

La scheda tecnica è composta da due pagine organizzate in modo chiaro e strutturato, seguendo l'impostazione tipica di un documento tecnico rivolto a un pubblico specializzato nel settore edilizio. La prima pagina è articolata in sezioni distinte, ciascuna finalizzata a fornire informazioni puntuali e facilmente leggibili sul prodotto analizzato.

L'intestazione riporta il codice identificativo del prodotto, accompagnato dai dati principali relativi al produttore, al fornitore, alla sede di produzione e ai contatti, inclusi eventuali riferimenti digitali. Accanto a tali informazioni è previsto uno spazio dedicato alla rappresentazione grafica o fotografica del prodotto.

Segue una sezione descrittiva, in cui viene presentata una sintesi delle caratteristiche tecniche e funzionali del prodotto, con particolare attenzione agli ambiti di impiego e alle possibili applicazioni nei diversi contesti edilizi. In questa parte sono inoltre indicati il tipo di utilizzo e il costo orientativo, quando disponibile, oltre a eventuali allegati tecnici o documentazione di supporto.

Un elemento centrale della scheda è costituito dalla classificazione per complessità del prodotto, che consente di inquadrare l'elemento all'interno della filiera edilizia distinguendolo tra materiale, semilavorato, componente o sistema, fino al prodotto edilizio completo.

Tale classificazione è affiancata dall'inquadramento secondo la normativa UNI 8290, che identifica la posizione del prodotto all'interno del sistema tecnologico dell'edificio, specificando classe, unità tecnologica ed elementi tecnici di appartenenza. Questa doppia lettura consente una comprensione integrata sia della natura del prodotto sia del suo ruolo nel processo costruttivo.

La parte inferiore della scheda è dedicata alla rappresentazione delle prestazioni secondo le classi di esigenza definite dalla UNI 8289:1981. Attraverso un sistema di indicatori visivi, vengono sintetizzati i livelli prestazionali relativi a sicurezza, benessere, affidabilità, fruibilità, gestione, aspetto e salvaguardia dell'ambiente.

Tale modalità grafica consente un confronto immediato tra prodotti diversi, evidenziando punti di forza e criticità in relazione ai requisiti normativi. A completamento della scheda, sono riportate le caratteristiche dimensionali del prodotto e l'eventuale presenza di pezzi speciali o varianti, elementi fondamentali per la progettazione esecutiva e la corretta integrazione nel sistema edilizio.

|                                                                                                                    |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>Produttore:</b>                                                                                                 | <input type="text"/> |
| <b>Fornitore:</b>                                                                                                  | <input type="text"/> |
| <b>Sede di produzione:</b>                                                                                         | <input type="text"/> |
| <b>Sito internet:</b>                                                                                              | <input type="text"/> |
| <b>Contatti:</b>                                                                                                   | <input type="text"/> |
|                                                                                                                    | <input type="text"/> |
|                                                                                                                    | <input type="text"/> |
|                                                                                                                    | <input type="text"/> |
|                                                                                                                    | <input type="text"/> |
|  <b>Descrizione del prodotto:</b> | <input type="text"/> |
|                                                                                                                    | <input type="text"/> |
|                                                                                                                    | <input type="text"/> |
|  <b>Tipo di impiego:</b>          | <input type="text"/> |
|  <b>Costo:</b>                    | <input type="text"/> |
| <b>Allegati:</b>                                                                                                   | <input type="text"/> |

- Materiale trattato industrialmente amorfo
- Materiale semilavorato
- Materiale e/o componente semilavorato a sistema
- Semi-componente
- Componente
- Componente a sistema
- Prodotto edilizio completo

| Classificazione per sistema tecnologico - Norma UNI EN 290                                                                                                                                                                  |                                  |                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Classi unità tecnologiche                                                                                                                                                                                                   | Unità tecnologiche               | Classi di elementi tecnici                                                                                           |
| <b>Struttura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici appartenenti al sistema edilizio aventi funzione di sostenere i carichi del sistema edilizio stesso e di collegare staticamente le sue parti. | struttura di fondazione          | strutture di fondazione dirette<br>strutture di fondazione indirette                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                             | struttura di elevazione          | strutture di elevazione verticali<br>strutture di elev. orizzontali ed inclinate<br>strutture di elevazione spaziali |
|                                                                                                                                                                                                                             |                                  | strutture di contenimento verticali<br>strutture di contenimento orizzontali                                         |
|                                                                                                                                                                                                                             | struttura di contenimento        |                                                                                                                      |
| <b>Chiusura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi in parti del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.          | chiusura verticale               | pareti perimetrali verticali<br>infissi esterni verticali<br>solai a terra                                           |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura orizzontale inferiore   | infissi orizzontali                                                                                                  |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura orizz. su spazi esterni | solai su spazi aperti                                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura superiore               | coperture                                                                                                            |
|                                                                                                                                                                                                                             |                                  | infissi esterni orizzontali                                                                                          |
| <b>Partizione interna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.                         | partizione interna verticale     | pareti interne verticali<br>infissi interni verticali<br>elementi di protezione<br>solai                             |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione interna orizzontale   | soppalchi<br>infissi interni orizzontali                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                             |                                  | scale interne                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione interna inclinata     | rampe interne                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione esterna verticale     | elementi di protezione<br>elementi di separazione                                                                    |
| <b>Partizione esterna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi esterni connessi con il sistema edilizio stesso.             | partizione esterna orizzontale   | balconi e logge<br>passerelle                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione esterna inclinata     | scale esterne                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             |                                  | rampe esterne                                                                                                        |

| Sicurezza                      |       | Benessere                    |       | Affidabilità                            |       |
|--------------------------------|-------|------------------------------|-------|-----------------------------------------|-------|
| Resistenza meccanica           | ●●●●● | Tenuta all'acqua             | ●●●●● | Resistenza ai fenomeni chimici e fisici | ●●●●● |
| Resistenza a compressione      | ●●●●● | Permeabilità all'aria        | ●●●●● | Durata                                  | ●●●●● |
| Resistenza a trazione          | ●●●●● | Isolamento termico           | ●●●●● | Fruibilità                              | ●●●●● |
| Resistenza agli urti           | ●●●●● | Comportamento igrometrico    | ●●●●● |                                         |       |
| Resistenza all'abrasione       | ●●●●● | Isolamento acustico          | ●●●●● | Gestione                                | ●●●●● |
| Comportamento al fuoco         | ●●●●● | Emissione di sostanze nocive | ●●●●● |                                         |       |
| Resistenza agli agenti chimici | ●●●●● | Ventilazione                 | ●●●●● | Salvaguardia dell'ambiente              | ●●●●● |
| Resistenza al gelo             | ●●●●● | Aspetto                      | ●●●●● |                                         |       |
| Stabilità dimensionale         | ●●●●● |                              |       | Regolarità di aspetto                   | ●●●●● |

Charakteristische Dimensionen der Sozialen Praxis:

#### 5.4.1.2 Composizione delle schede dei prodotti: scheda n.2

La seconda scheda di prodotto si configura come un approfondimento tecnico–descrittivo della prima, integrando e completando le informazioni sintetiche precedentemente introdotte.

La struttura della pagina è impostata secondo una logica narrativa che alterna testo, immagini e apparati grafici, con l’obiettivo di restituire una lettura più articolata delle caratteristiche del prodotto e del suo impiego nel contesto edilizio. La parte superiore della scheda è generalmente occupata da un’intestazione che richiama il prodotto analizzato e introduce il contenuto della pagina, seguita da una o più immagini esplicative.

Tali elementi visivi, che possono includere fotografie di applicazione in opera o dettagli costruttivi, svolgono una funzione fondamentale nel chiarire le modalità di utilizzo e nel contestualizzare il prodotto all’interno di situazioni reali. Le immagini non hanno quindi solo valore illustrativo, ma contribuiscono attivamente alla comprensione delle prestazioni e delle potenzialità applicative.

Il corpo centrale della scheda è costituito da un testo descrittivo continuo, organizzato in paragrafi che approfondiscono le caratteristiche tecniche, le modalità di installazione e le condizioni di esercizio del prodotto. In questa sezione vengono sviluppati aspetti quali il comportamento del materiale, le prestazioni dichiarate, i vantaggi operativi e le eventuali criticità riscontrabili in fase di posa o utilizzo.

A supporto del testo, sono inseriti elementi grafici e schemi sintetici che permettono di evidenziare informazioni specifiche, come ad esempio sistemi di fissaggio, tempi medi di posa, configurazioni di montaggio o sequenze operative. Questi apparati contribuiscono a rendere la scheda uno strumento operativo, facilitando la comprensione immediata di dati che, se espressi esclusivamente in forma testuale, risulterebbero meno intuitivi.

La parte inferiore della pagina è dedicata all’inquadramento prestazionale e funzionale del prodotto, in continuità con la scheda n.1. In questa sezione vengono richiamati i principali indicatori di prestazione e, ove necessario, ulteriormente commentati o messi in relazione con le specifiche condizioni d’uso.

## CODICE PRODOTTO

### Caratteristiche fisiche e termiche del prodotto

 Materiale:

 Densità [kg/m3]:   Conducibilità termica  $\lambda$  [W/mK]:

 Peso [kg/m2]:   Calore specifico [J/KgK]:

### Proprietà meccaniche e resistenze

 Resistenza:   Comportamento al fuoco:

### Proprietà di protezione e isolamento

 Resistenza agli agenti chimici\_permeabilità al metano:

 Tenuta all'acqua:   Permeabilità al vapore acqueo [g/m2 /24]:

### Comportamento con variazioni di temperatura

 Resistenza al gelo:   Stabilità di forma a caldo:

### Proprietà meccaniche specifiche

 Resistenza a trazione a rottura [L/T]:

 Resistenza alla trazione delle giunzioni [L/T]:

 Allungamento alla massima resistenza alla trazione:

 Resistenza alla lacerazione (metodo del chiodo):

### Aspetto e durata

 Colore:   Durata:

### Uso e Manutenzione

### Sistema di fissaggio



### Tempo medio di messa in opera



### Distaccante



### Risorse umane

### FASI della messa in opera

### Altre info

### Immagini del prodotto



## CLa\_04a

**Produttore:** PLASMACEM\_ Grecata B 0303  
**Fornitore:** Rekreo s.r.l.  
**Sede di produzione:** Vicenza, Italia  
**Sito internet:** <https://www.plasmacem.com/>  
**Contatti:** Tel. +39 0444 546968  
Fax +39 0444 1830461  
E-Mail [info@plasmacem.com](mailto:info@plasmacem.com)  
[PEC@rekreo.it](mailto:PEC@rekreo.it)



### Descrizione del prodotto:

Il prodotto è una matrice speciale progettata per il calcestruzzo e gli elementi in cemento, caratterizzata da disegni personalizzati. Ogni matrice è realizzata con le stesse elevate caratteristiche meccaniche e tecniche delle soluzioni tradizionali, garantendo resistenza, durata e precisione. Si distingue per la sua capacità di offrire soluzioni esteticamente distinte e funzionali per la creazione di strutture in calcestruzzo e cemento di alta qualità.



**Tipo di impiego:** edilizia/costruzione



**Costo:** Per 50 riutilizzi indicativamente è di 198,00€/mq

### Allegati:

<https://www.plasmacem.com/it/matrici-per-il-calcestruzzo-facciavista-prefabbricato-casseri-in-cemento/cp-6-matrici-per-il-calcestruzzo-architettonico>



### Classificazione per complessità di prodotto

- ☐ Materiale trattato industrialmente amorfo
 ☐ Semi-componente
 ☐ Prodotto edilizio completo
- ☐ Materiale semilavorato
 ☐ Componente
- ☒ Materiale e/o componente semilavorato a sistema
 ☒ Componente a sistema

### Classificazione del sistema tecnologico\_ norma UNI8290

| Classi unità tecnologiche                                                                                                                                                                                                   | Unità tecnologiche               | Classi di elementi tecnici                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Struttura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici appartenenti al sistema edilizio aventi funzione di sostenere i carichi del sistema edilizio stesso e di collegare staticamente le sue parti. | struttura di fondazione          | strutture di fondazione dirette<br>strutture di fondazione indirette                                                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                             | struttura di elevazione          | strutture di elevazione verticali<br>strutture di elev. orizzontali ed inclinate<br>strutture di elevazione spaziali                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                             | struttura di contenimento        | strutture di contenimento verticali<br>strutture di contenimento orizzontali                                                                                           |
| <b>Chiusura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi in terni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.          | chiusura verticale               | pareti perimetrali verticali<br>infissi esterni verticali<br>solai a terra<br>infissi orizzontali<br>solai su spazi aperti<br>coperture<br>infissi esterni orizzontali |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura orizzontale inferiore   |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura orizz. su spazi esterni |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura superiore               |                                                                                                                                                                        |
| <b>Partizione interna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.                         | partizione interna verticale     | pareti interne verticali<br>infissi interni verticali<br>elementi di protezione                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione interna orizzontale   | solai<br>soppalchi<br>infissi interni orizzontali<br>scale interne<br>rampe interne                                                                                    |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione interna inclinata     |                                                                                                                                                                        |
| <b>Partizione esterna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi esterni connessi con il sistema edilizio stesso.             | partizione esterna verticale     | elementi di protezione<br>elementi di separazione<br>balconi e logge<br>passerelle<br>scale esterne<br>rampe esterne                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione esterna orizzontale   |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione esterna inclinata     |                                                                                                                                                                        |

### Classe di Esigenze\_ norma UNI8290

| Sicurezza                      | Benessere                    | Affidabilità                            |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| Resistenza meccanica           | Tenuta all'acqua             | Resistenza ai fenomeni chimici e fisici |
| Resistenza a compressione      | Permeabilità all'aria        | Durata                                  |
| Resistenza a trazione          | Isolamento termico           |                                         |
| Resistenza agli urti           | Comportamento igrometrico    | Fruibilità                              |
| Resistenza all'abrasione       | Isolamento acustico          | Attrezzabilità                          |
| Comportamento al fuoco         | Emissione di sostanze nocive | Manutenzione                            |
| Resistenza agli agenti chimici | Ventilazione                 | Manutenibilità                          |
| Resistenza al gelo             |                              |                                         |
| Stabilità dimensionale         | Regolarità di aspetto        | Gestione                                |
|                                |                              | Influenza sui consumi energetici        |

### Caratteristiche dimensionali ed eventuali pezzi speciali

| Codice             | Str/0303- Grecata B | Flx/0303- Grecata B | Esx/0303- Grecata B         |
|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|
| Dimensioni (L x H) | 660 x 3500 mm       | 660 x 9200 mm       | 660 x 9200 mm / A richiesta |

#### Caratteristiche fisiche e termiche del prodotto

-  Materiale: Poliuretano elastomerico flessibile ad alta definizione
-  Densità [kg/m<sup>3</sup>]: 485
-  Conducibilità termica  $\lambda$  [W/mK]: /
-  Peso [kg/m<sup>2</sup>]: 11,9
-  Calore specifico [J/KgK]: /

#### Proprietà meccaniche e resistenze

-  Resistenza: Meccanicamente flessibile, alta resistenza alla deformazione
-  Comportamento al fuoco: Classe E

#### Proprietà di protezione e isolamento

-  Resistenza agli agenti chimici \_permeabilità al metano: Non applicabile
-  Tenuta all'acqua: sì, superficie non porosa
-  Permeabilità al vapore acqueo [g/m<sup>2</sup>/24h]: Non applicabile

#### Comportamento con variazioni di temperatura

-  Resistenza al gelo: Flessibile anche a basse temperature
-  Stabilità di forma a caldo: ~70–80 °C max

#### Proprietà meccaniche specifiche

-  Resistenza a trazione a rottura [L/T]: Non indicata, materiale non strutturale
-  Resistenza alla trazione delle giunzioni [L/T]: /
-  Allungamento alla massima resistenza alla trazione: ≈ 300% tipico degli elastomeri PU
-  Resistenza alla lacerazione (metodo del chiodo): Alta

#### Aspetto e durata

-  Colore: Grigio o su richiesta (per esigenze visive)
-  Durata: Alta

#### Uso e Manutenzione

Se non utilizzata, pulire e coprire la matrice con un telo e un pannello rigido. Evitare disarmanti e oggetti che possano danneggiarla. In caso di smontaggio, le matrici incollate con colla bicomponente sono difficili da rimuovere, mentre con colla monocomponente si può tentare con cura. Conservare le matrici in piano, possibilmente in zone ombreggiate.

#### Sistema di fissaggio

-  Su cassaforma in legno o metallo con colla o staffe

#### Tempo medio di messa in opera

-  1–2 ore

#### Distaccante

-  Necessario – specifici agenti distaccanti consigliati

#### Risorse umane



#### FASI della messa in opera

1. Taglio e posizionamento matrice su cassaforma
2. Applicazione distaccante specifico
3. Posizionamento armature e getto calcestruzzo
4. Disarmo con attenzione dopo presa
5. Pulizia e stoccaggio per riutilizzo

#### Altre info

##### Attrezzi, accessori, dispositivi

- Fratrone dentato per stesura colla 7x7mm
- Spatola per stesura colla (consigliata)
- Coltello con lama (25mm) maggiorata retrattile per taglio/rifilo matrice
- Disco lamellare grana 40 per "carteggiatura" meccanica dorso matrice
- Metro flessibile (8mt)
- Staggia in alluminio (misura a richiesta)
- Pompa manuale nebulizzatrice per disarmate (8 litri €/pezzo)
- Multiattrezzo taglio matrici e pulitura casseri (consigliato uno)
- PLASDI' d iluente pulitura matrici tanica 10 L

#### Immagini del prodotto

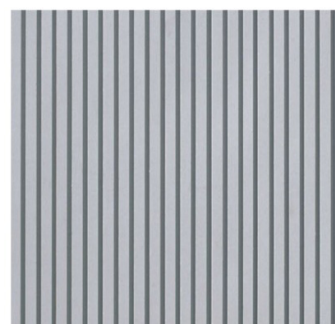


Fig.1\_

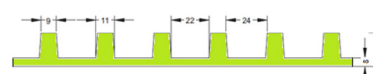


Fig.2\_

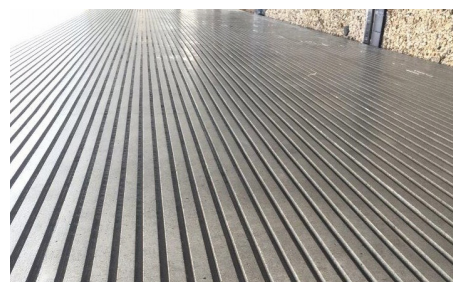


Fig.2\_



Fig.2\_



Fig.3\_

## 5.5 Identificazione delle classi di esigenza secondo la UNI 8289:1981

La classificazione delle esigenze e dei requisiti utilizzata nella presente ricerca trae fondamento dal quadro concettuale definito dalle norme italiane precedentemente citate, UNI 8289:1981 e UNI 8290:1981, che costituiscono i principali riferimenti per l'individuazione delle categorie di esigenze dell'utenza e dei corrispondenti requisiti prestazionali in ambito edilizio (UNI 8289, 1981). Tali documenti normativi forniscono la base metodologica per la valutazione delle qualità tecniche e funzionali dei componenti costruttivi, adottando un'impostazione di tipo prestazione-domanda, in cui le caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali vengono messe in relazione con le funzioni che essi sono chiamati a svolgere all'interno del sistema edilizio complessivo.

In base a quanto stabilito dalla UNI 8289:1981, il sistema edilizio può essere analizzato attraverso sette classi fondamentali di esigenza: sicurezza, benessere, fruibilità, aspetto, gestione, integrabilità e salvaguardia dell'ambiente:

**4.1 Sicurezza (S):** Insieme delle condizioni relative alla incolumità degli utenti, nonché alla difesa e prevenzione di danni in dipendenza da fattori accidentali, nell'esercizio del sistema edilizio.

**4.2. Benessere (B):** Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti.

**4.3. Fruibilità (F):** Insieme delle condizioni relative all'attitudine del sistema edilizio ad essere adeguatamente usato dagli utenti nello svolgimento delle attività.

**4.4. Aspetto (A):** Insieme delle condizioni relative alla fruizione percettiva del sistema edilizio da parte degli utenti.

**4.5. Gestione (G):** Insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio.

**4.6 Integrabilità (I):** Insieme delle condizioni relative all'attitudine delle unità e degli elementi del sistema edilizio a connettersi funzionalmente tra di loro

**4.7 Salvaguardia dell'ambiente (Sa):** Insieme delle condizioni relative al mantenimento e miglioramento degli stati dei sovrassistemi di cui il sistema edilizio fa parte.

Le classi di esigenza sono a loro volta articolate in requisiti e parametri di prestazione che permettono di strutturare un sistema di valutazione coerente, attraverso il quale i dati qualitativi e quantitativi possono essere analizzati e confrontati in modo integrato e sono le seguenti:

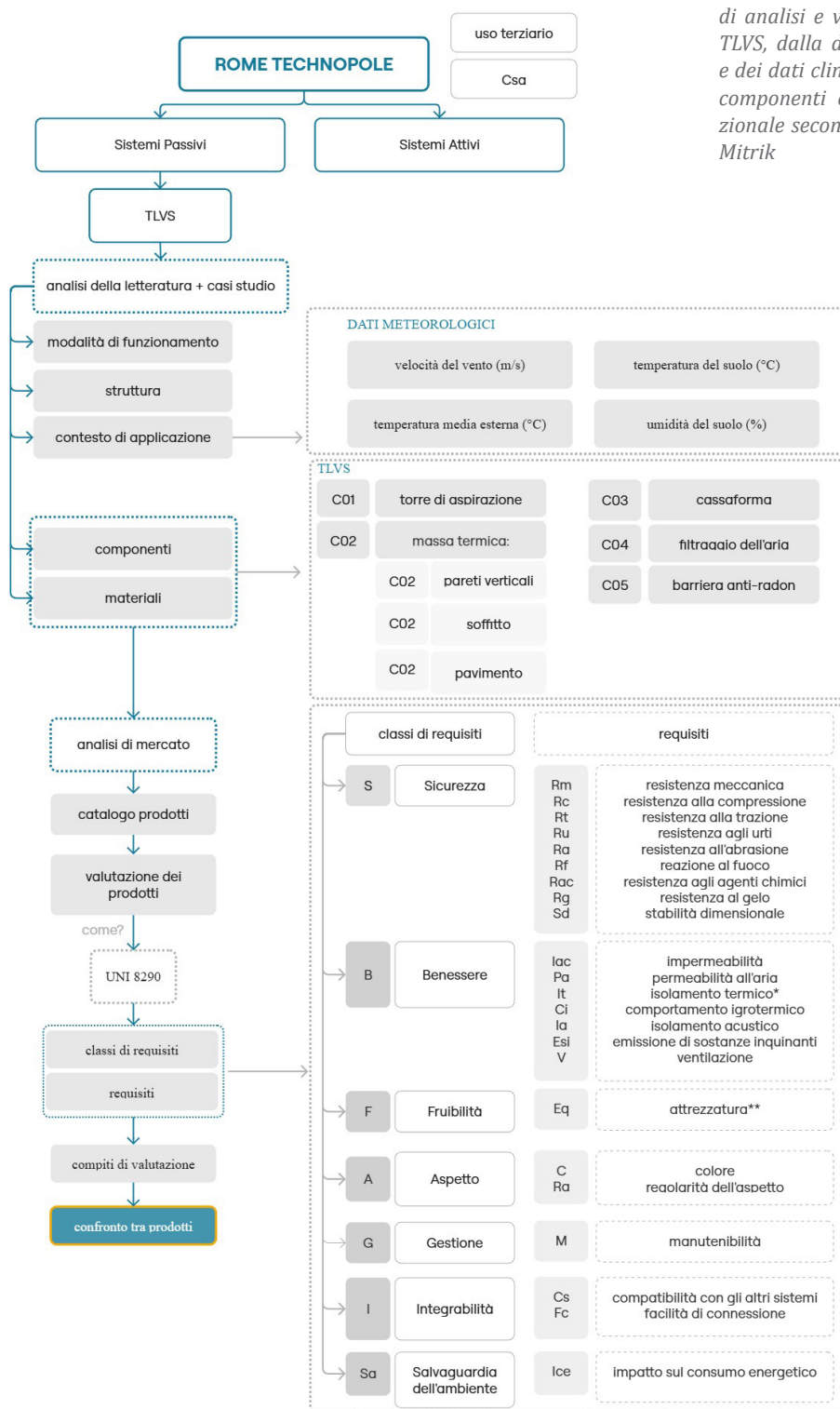
- La classe della sicurezza comprende tutti i requisiti volti a garantire la protezione degli utenti e la stabilità dell'organismo edilizio. Essa considera la resistenza meccanica e alla compressione, che assicurano la solidità del componente sotto carico, la resistenza alla trazione e agli urti, che ne determinano la capacità di sopportare sollecitazioni accidentali, e la resistenza all'abrasione, utile a preservare la durata delle superfici soggette a usura. A questi si aggiungono la reazione al fuoco, la resistenza agli agenti chimici e al gelo-disgelo, nonché la stabilità dimensionale, che assicura il mantenimento delle forme e delle tolleranze nel tempo e in condizioni ambientali variabili.
- La classe del benessere raccoglie i requisiti legati alla qualità ambientale e al comfort degli spazi costruiti. Essa comprende l'impermeabilità all'acqua e la permeabilità all'aria, che regolano i flussi e le interazioni tra interno ed esterno, l'isolamento termico e il comportamento igrotermico, che garantiscono la stabilità del microclima interno, e l'isolamento acustico, che contribuisce alla riduzione dei rumori trasmessi. Completano il quadro l'attenzione alle emissioni di sostanze inquinanti e alla ventilazione naturale, parametri fondamentali per la salubrità e la qualità dell'ambiente abitato.
- La classe della fruibilità riguarda la capacità dei componenti edilizi di essere facilmente utilizzati, installati e mantenuti nel tempo. In essa rientrano la lavorabilità, intesa come facilità di posa e adattamento alle condizioni di cantiere, le dimensioni, che influenzano la modularità e la compatibilità geometrica, e il peso, parametro determinante per la maneggevolezza, la sicurezza e la rapidità delle operazioni di montaggio.
- La classe dell'aspetto si riferisce alle caratteristiche percettive

e formali dei componenti edilizi, con particolare attenzione alla loro capacità di contribuire alla qualità estetica complessiva dell'opera. I parametri di riferimento sono il colore, la regolarità del disegno e la finitura superficiale, elementi che incidono sulla percezione visiva e sull'integrazione del componente con il contesto architettonico e ambientale.

- La classe della gestione comprende i requisiti associati all'efficienza del ciclo di vita e alla sostenibilità economica del componente. I principali parametri sono la manutenibilità, intesa come facilità di pulizia e di intervento nel tempo, e la durabilità, che esprime la capacità del materiale o del sistema di conservare le proprie prestazioni funzionali e meccaniche per l'intera vita utile prevista.
- La classe dell'integrabilità riguarda l'attitudine del componente a connettersi e interagire con altri elementi del sistema edilizio in modo coerente e funzionale. Tale requisito include la compatibilità con altri sistemi costruttivi, la coerenza dimensionale e materica e la facilità di connessione e montaggio, aspetti che garantiscono l'efficienza dell'assemblaggio e la continuità delle prestazioni dell'intero organismo edilizio.
- La classe della salvaguardia dell'ambiente si riferisce ai requisiti legati alla sostenibilità ambientale e all'efficienza energetica. I parametri più significativi sono la riciclabilità dei materiali, l'influenza del componente sui consumi energetici e l'impatto ambientale complessivo del suo ciclo di vita, che comprende la produzione, l'uso e la dismissione. Tali aspetti mirano a ridurre l'energia incorporata nei materiali e a promuovere pratiche costruttive orientate alla riduzione delle emissioni e al rispetto delle risorse naturali.

Nel complesso, la combinazione di queste classi e dei relativi parametri consente di definire un approccio prestazionale unitario, applicabile a diverse tipologie di componenti edilizi. In base alla natura del prodotto analizzato, alcune classi possono assumere un peso maggiore rispetto ad altre, ma l'impianto metodologico garantisce una base di confronto coerente e integrata tra materiali, tecnologie e sistemi costruttivi (*Tabella 5.2*).

*Schema 5.2 Schema metodologico di analisi e valutazione del sistema TLVS, dalla definizione del contesto e dei dati climatici alla selezione dei componenti e al confronto prestazionale secondo UNI 8290. Fonte: K. Mitrik*



\*L'isolamento termico è definito da quattro parametri principali: trasmittanza termica, conducibilità termica, densità e capacità termica specifica

\*\* Le attrezzature sono definite da tre parametri principali: maneggevolezza, dimensioni e peso



### 5.5.1 Valutazione comparativa dei prodotti delle Intake Towers (CLaTa)

La torre di presa d'aria (Intake Tower) rappresenta l'elemento di interfaccia tra l'ambiente esterno e il circuito ipogeo del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), svolgendo una funzione essenziale di captazione, filtraggio e regolazione del flusso d'aria. Tale componente deve garantire nel tempo la protezione del sistema sotterraneo da infiltrazioni e agenti atmosferici, assicurando al contempo continuità di ventilazione e stabilità termo-igrometrica (*Schema 5.3*).

L'analisi è stata condotta secondo la UNI 8289:1981, che definisce le esigenze dell'utenza finale in sette classi principali – Sicurezza, Benessere, Fruibilità, Aspetto, Gestione, Integrabilità e Salvaguardia dell'ambiente – ciascuna articolata in specifici sotto-requisiti tecnici. L'obiettivo è valutare la coerenza dei diversi modelli di torre (CLaTa\_01, CLaTa\_02a, CLaTa\_02b, CLaTa\_03, CLaTa\_04) rispetto alle condizioni operative tipiche di un impianto TLVS.

Per quanto concerne la Sicurezza, la torre CLaTa\_02b si distingue nettamente per le migliori prestazioni (4.5/5). L'elevata resistenza a compressione, trazione e urti è dovuta alla struttura metallica a telaio rigido e allo spessore dei profili, che conferiscono al componente una stabilità dimensionale superiore. I modelli CLaTa\_01 (3.7/5) e CLaTa\_04 (3.65/5) mostrano valori equilibrati, mentre la CLaTa\_02a (3.2/5), più leggera, evidenzia una resistenza inferiore ma comunque adeguata. La CLaTa\_03 (3.0/5) risulta la meno performante sotto questo aspetto.

Nel requisito di Benessere, la CLaTa\_02a emerge come il modello più performante (3.7/5). La sua geometria a lamelle sottili e l'ampia area libera determinano una permeabilità all'aria elevata e una perdita di carico ridotta, assicurando un flusso costante e uniforme. I modelli CLaTa\_01 e CLaTa\_03 presentano prestazioni intermedie (3.0/5), mentre CLaTa\_02b (2.8/5) e soprattutto CLaTa\_04 (2.0/5) risultano penalizzati per la maggiore resistenza al flusso.

La Gestione, intesa come economia di esercizio e facilità di manutenzione, premia la CLaTa\_03 (4.5/5), grazie alla configurazione modulare e alla facilità di accesso ai componenti. Anche la CLaTa\_02a mostra buone prestazioni (4.0/5), mentre CLaTa\_01 (3.5/5) e CLaTa\_04 (3.0/5) si collocano su livelli intermedi. La CLaTa\_02b risulta meno efficiente (2.0/5) a causa della maggiore complessità e massa strutturale.

Per quanto riguarda l'Integrabilità, la CLaTa\_02a (4.25/5) e la CLaTa\_03 (4.0/5) garantiscono la migliore compatibilità con gli altri

componenti del sistema, grazie alla geometria standardizzata e alla facilità di connessione. La CLaTa\_01 (3.25/5) presenta buone prestazioni, mentre CLaTa\_02b e CLaTa\_04 (3.0/5) risultano più limitate sotto questo aspetto.

Infine, il requisito di Salvaguardia dell'ambiente conferma la superiorità della CLaTa\_02a, che ottiene il punteggio massimo (5.0/5). L'elevata efficienza aerodinamica e la ridotta perdita di carico contribuiscono a diminuire i consumi energetici dei ventilatori. La CLaTa\_01 si attesta su valori elevati (4.0/5), mentre CLaTa\_03 (2.5/5) e CLaTa\_02b (1.5/5) risultano meno efficienti. La CLaTa\_04 presenta le prestazioni più basse (0.0/5).

Considerando l'insieme dei punteggi, la CLaTa\_02a risulta la soluzione complessivamente più performante (4.0/5), seguita da CLaTa\_01 (3.5/5) e CLaTa\_03 (3.4/5). La CLaTa\_02b (2.75/5), pur eccellendo in termini di sicurezza, risulta penalizzata da prestazioni inferiori negli altri requisiti, mentre la CLaTa\_04 (2.3/5) evidenzia le criticità maggiori.

In conclusione, la CLaTa\_02a può essere individuata come la soluzione tecnologica più idonea per l'integrazione in un Thermal Labyrinth Ventilation System.

Essa rappresenta il miglior compromesso tra efficienza energetica, permeabilità all'aria, facilità di gestione e compatibilità impiantistica, rispondendo in modo ottimale alle esigenze di benessere e sostenibilità ambientale definite dalla UNI 8289.

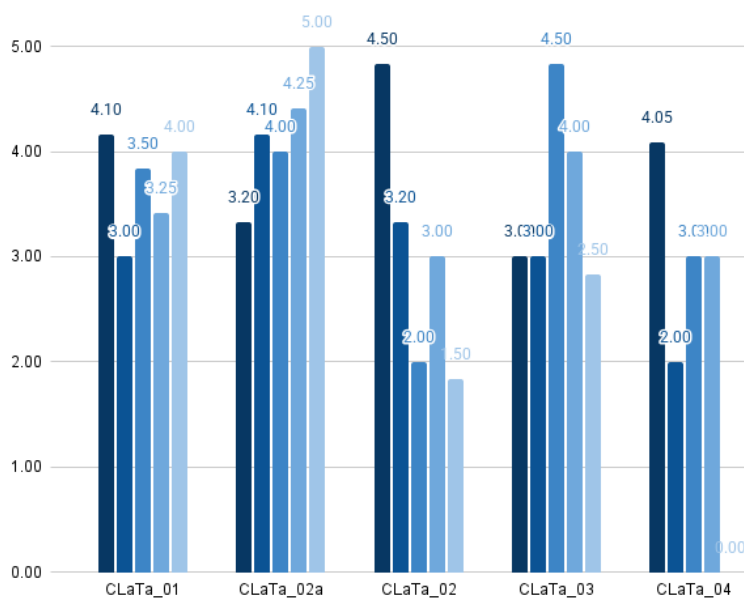


Grafico 5.1 Punteggi dei prodotti CLaTa per criterio e punteggio totale. Fonte: K. Mitrik

Legenda:

- Sicurezza
- Benessere
- Gestione
- Affidabilità
- Salvaguardia dell'ambiente

*Schema 5.3* Schema di valutazione comparativa delle torri di aspirazione dell'aria esterna per il TLVS (CLaTa\_01-CLaTa\_04).  
Fonte: K. Mitrik

| TORRI DI ASPIRAZIONE DELL'ARIA ESTERNA (CLaTa) |               |           |           |          |          |          |
|------------------------------------------------|---------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
|                                                |               | CLaTa_01  | CLaTa_02a | CLaTa_02 | CLaTa_03 | CLaTa_04 |
| S                                              | Ms            | 3.5       | 3.0       | 5.0      | 3.0      | 4.0      |
|                                                | Cs            | 3.6       | 3.2       | 4.7      | 3.0      | 4.0      |
|                                                | Ts            | 4.0       | 3.0       | 5.0      | 3.0      | 4.0      |
|                                                | Is            | 4.0       | 3.2       | 4.8      | 3.0      | 3.5      |
|                                                | fi            | 3.0       | 5.0       | 3.5      | 3.0      | 3.5      |
|                                                | Rac           | 3.8       | 2.5       | 4.0      | 3.0      | 3.0      |
|                                                | Fr            | 3.5       | 3.0       | 4.5      | 3.0      | 3.0      |
|                                                | Ds            | 3.8       | 3.5       | 4.8      | 3.0      | 3.5      |
|                                                | PARTIAL SCORE | 3.7/5     | 3.2/5     | 4.5/5    | 3.0/5    | 3.65/5   |
| W                                              | Wt            | 3.5       | 4.0       | 2.5      | 3.0      | 2.0      |
|                                                | Ap            | 3.0       | 4.5       | 2.0      | 3.0      | 1.5      |
|                                                | Ti            | 5.0       | 0.0       | 0.35     | 0.0      | 0.0      |
|                                                |               | U         |           |          |          |          |
|                                                |               | $\lambda$ | 5.0       | 0.0      | 0.7      | 0.7      |
|                                                |               | $\rho$    | 0.0       | 0.0      | 5.0      | 0.0      |
|                                                |               | Cp        | 5.0       | 0.3      | 0.3      | 0.2      |
|                                                | Hb            | 2.5       | 3.0       | 3.5      | 2.0      | 1.5      |
|                                                | Hb            | 3.0       | 3.5       | 2.5      | 3.0      | 2.0      |
|                                                | EmP           | 4.0       | 4.5       | 3.5      | 4.0      | 3.0      |
|                                                | V             | 3.0       | 4.5       | 1.5      | 3.5      | 1.5      |
|                                                | PARTIAL SCORE | 3.0/5     | 3.7/5     | 2.8/5    | 3.0/5    | 2.0/5    |
| M                                              | M             | 3.5       | 4.0       | 2.0      | 4.5      | 3.0      |
| PARTIAL SCORE                                  |               | 3.5/5     | 4.0/5     | 2.0/5    | 4.5/5    | 3.0/5    |
| R                                              | Rcp           | 3.5       | 4.5       | 3.0      | 4.0      | 3.0      |
|                                                | D             | 3.0       | 4.0       | 3.0      | 4.0      | 3.0      |
| PARTIAL SCORE                                  |               | 3.25/5    | 4.25/5    | 3.0/5    | 4.0/5    | 3.0/5    |
| Eq                                             | En            | 4.0       | 5.0       | 1.5      | 2.5      | 0.0      |
| PARTIAL SCORE                                  |               | 4.0/5     | 5.0/5     | 1.5/5    | 2.5/5    | 0.0/5    |
| TOTAL SCORE                                    |               | 3.5/5     | 4/5       | 2.75/5   | 3.4/5    | 2.3/5    |

### 5.5.2 Valutazione comparativa dei prodotti delle Massa Termica (CLaC)

Gli elementi prefabbricati in calcestruzzo destinati a costituire la massa termica del sistema TLVS assumono un ruolo determinante nel garantire la stabilità del comportamento termo-fluidodinamico del labirinto. A differenza di componenti leggeri o membranosi, questi elementi operano come grandi volumi ad alta inerzia, capaci di modulare le oscillazioni termiche e di assicurare al sistema una risposta graduale e controllata nel tempo (*Schema 5.4*). La loro valutazione è stata condotta in riferimento alla UNI 8289, selezionando i requisiti effettivamente pertinenti per un componente massivo e trascurando quelli marginali (come ventilazione diretta o emissioni).

Dal punto di vista della Sicurezza, i prefabbricati in calcestruzzo mostrano prestazioni elevate e omogenee, con punteggi compresi tra 4.0/5 e 4.8/5. La resistenza meccanica del materiale (30–60 MPa) consente di assorbire le spinte del terreno e di mantenere invariata la geometria dei canali. La stabilità dimensionale, unita alla totale incombustibilità (Euroclasse A1) e alle elevate prestazioni di resistenza al fuoco (REI 120–240), garantisce un comportamento affidabile anche in condizioni gravose. I valori più alti sono associati agli elementi con maggiore spessore e continuità strutturale, mentre configurazioni più leggere mostrano comunque prestazioni pienamente adeguate.

Per quanto riguarda il Benessere, i punteggi risultano compresi tra 3.0/5 e 4.3/5, evidenziando come la massa termica rappresenti il principale fattore prestazionale. La densità (2200–2500 kg/m<sup>3</sup>) e la capacità termica (840–1000 J/kgK) permettono di accumulare energia e restituirla gradualmente, garantendo uno sfasamento termico significativo. Le soluzioni con maggiore massa superficiale (fino a 700 kg/m<sup>2</sup>) raggiungono i valori più elevati (~4.2–4.3/5), mentre quelle più snelle, pur mantenendo buone prestazioni (~3.0/5), risultano meno efficaci nella smorzatura delle oscillazioni termiche.

All'interno della Fruibilità, i valori si collocano mediamente tra 3.0/5 e 4.2/5. La prefabbricazione consente un'elevata precisione geometrica e superfici interne regolari, fondamentali per ridurre le perdite di carico e garantire un comportamento aerodinamico ottimale. Nonostante le masse elevate, la presenza di inserti di sollevamento e la standardizzazione degli elementi permettono una buona facilità di posa, con punteggi più alti per i sistemi modulari e leggermente inferiori per quelli più pesanti o complessi.

La classe dell'Aspetto, pur secondaria, assume un valore funzionale

con punteggi compresi tra 3.3/5 e 4.5/5. Superfici lisce e regolari riducono l'attrito dell'aria e limitano l'accumulo di depositi. Le soluzioni realizzate con casseri metallici e finiture controllate raggiungono i valori più elevati, contribuendo indirettamente all'efficienza complessiva del sistema.

In termini di Gestione, i prefabbricati mostrano prestazioni generalmente elevate (circa 4.0/5 – 4.8/5). La durabilità del calcestruzzo e la ridotta necessità di manutenzione rappresentano un vantaggio significativo. I punteggi più alti sono associati agli elementi con minori giunti e maggiore continuità, mentre sistemi più articolati o con maggiore complessità costruttiva presentano valori leggermente inferiori.

La classe di Integrabilità evidenzia valori mediamente compresi tra 3.3/5 e 4.7/5. I prefabbricati consentono un'elevata integrazione con il sistema TLVS grazie alla possibilità di progettazione su misura, all'inserimento di cavedi e predisposizioni impiantistiche e alla continuità dei percorsi d'aria. Le configurazioni più modulari e standardizzate risultano le più performanti, facilitando il montaggio e riducendo le discontinuità.

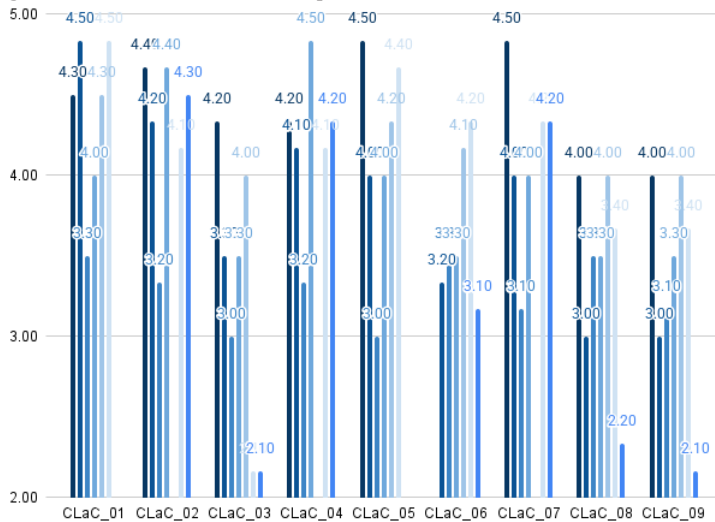
Infine, per quanto riguarda la Salvaguardia dell'ambiente, i punteggi variano tra 2.1/5 e 4.8/5, riflettendo le differenze tra soluzioni più o meno efficienti dal punto di vista energetico. Gli elementi con maggiore massa e migliore integrazione con strategie passive (ventilazione notturna, accumulo termico) raggiungono i valori più elevati, mentre configurazioni meno ottimizzate risultano penalizzate. La prefabbricazione contribuisce comunque a ridurre gli sprechi e a migliorare la sostenibilità complessiva del sistema.

**Grafico 5.2** *Punteggi dei prodotti CLaC per criterio e punteggio totale.*

Fonte: K. Mitrik

*Legenda:*

- Sicurezza
- Benessere
- Flessibilità
- Aspetto
- Gestione
- Innovazione
- Salvaguardia dell'ambiente



*Schema 5.4 Schema di valutazione comparativa degli elementi prefabbricati in calcestruzzo per la massa termica del TLVS (CLaC\_01-CLaC\_09). Fonte: K. Mitrik*

| TLVS_MASSA TERMICA (CLaC) |     |           |         |         |         |         |         |         |         |         |     |
|---------------------------|-----|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|
|                           |     | CLaC_01   | CLaC_02 | CLaC_03 | CLaC_04 | CLaC_05 | CLaC_06 | CLaC_07 | CLaC_08 | CLaC_09 |     |
| S                         | Rm  | 4.8       | 4.7     | 4.2     | 4.3     | 4.9     | 5.0     | 4.8     | 4.3     | 4.2     |     |
|                           | Rc  | 4.8       | 4.8     | 4.2     | 4.3     | 4.9     | 5.0     | 4.8     | 4.3     | 4.2     |     |
|                           | Rt  | 3.9       | 4.0     | 3.4     | 3.5     | 4.1     | 4.2     | 4.0     | 3.4     | 3.3     |     |
|                           | Ru  | 4.2       | 4.3     | 4.0     | 4.1     | 4.3     | 4.7     | 4.3     | 4.0     | 3.9     |     |
|                           | Ra  | 3.4       | 3.5     | 4.1     | 3.6     | 3.7     | 4.8     | 4.2     | 4.0     | 3.9     |     |
|                           | Rf  | 5.0       | 5.0     | 5.0     | 5.0     | 5.0     | 5.0     | 5.0     | 5.0     | 5.0     |     |
|                           | Rac | 3.3       | 3.8     | 3.7     | 3.4     | 3.9     | 3.8     | 3.8     | 3.2     | 3.1     |     |
|                           | Rg  | 4.2       | 4.8     | 4.1     | 4.7     | 4.8     | 4.9     | 4.8     | 4.0     | 4.0     |     |
|                           | Sd  | 4.9       | 4.9     | 4.8     | 4.8     | 5.0     | 5.0     | 4.9     | 4.8     | 4.8     |     |
| PARTIAL SCORE             |     | 4.3/5     | 4.4/5   | 4.2/5   | 4.2/5   | 4.5/5   | 4.7/5   | 4.5/5   | 4.1/5   | 4.0/5   |     |
| W                         | Iac | 4.3       | 4.0     | 3.0     | 4.1     | 4.2     | 2.5     | 4.7     | 2.3     | 2.2     |     |
|                           | Pa  | 4.2       | 4.0     | 3.1     | 4.0     | 4.1     | 3.2     | 3.3     | 3.0     | 3.0     |     |
|                           | It  | U         | 4.9     | 4.2     | 1.2     | 4.1     | 3.4     | 1.0     | 4.3     | 1.1     | 1.1 |
|                           |     | $\lambda$ | 4.4     | 4.0     | 1.3     | 3.2     | 2.5     | 1.2     | 3.3     | 1.3     | 1.3 |
|                           |     | $\rho$    | 4.2     | 4.1     | 4.8     | 4.3     | 4.0     | 4.9     | 4.2     | 4.1     | 4.1 |
|                           |     | Cp        | 4.8     | 4.4     | 4.7     | 4.4     | 4.8     | 4.3     | 4.3     | 4.3     | 4.3 |
|                           | Ci  | 4.5       | 4.1     | 3.0     | 4.0     | 3.6     | 2.8     | 4.0     | 2.7     | 2.7     |     |
|                           | Est | 4.7       | 4.2     | 3.0     | 4.1     | 4.1     | 3.2     | 3.3     | 3.0     | 3.0     |     |
|                           | V   | 4.8       | 4.7     | 4.0     | 4.7     | 4.8     | 4.1     | 4.2     | 4.0     | 4.0     |     |
|                           |     | 4.3       | 4.2     | 4.2     | 4.2     | 4.2     | 4.2     | 4.2     | 3.6     | 3.6     |     |
| PARTIAL SCORE             |     | 4.5/5     | 4.2/5   | 3.3/5   | 4.1/5   | 4.0/5   | 3.2/5   | 4.0/5   | 3.0/5   | 3.0/5   |     |
| F                         | Eq  | I         | 3.1     | 3.2     | 3.3     | 3.2     | 2.6     | 3.0     | 3.7     | 3.1     |     |
|                           |     | d         | 4.8     | 4.3     | 3.4     | 4.2     | 4.4     | 4.1     | 4.3     | 3.5     | 3.4 |
|                           |     | p         | 2.1     | 2.0     | 2.2     | 2.1     | 2.0     | 2.8     | 2.1     | 2.6     | 1.7 |
| PARTIAL SCORE             |     | 3.3/5     | 3.2/5   | 3.0/5   | 3.2/5   | 3.0/5   | 3.3/5   | 3.1/5   | 3.3/5   | 2.7/5   |     |
| A                         | C   | 3.2       | 4.0     | 2.4     | 4.2     | 3.1     | 2.3     | 3.3     | 2.5     | 2.5     |     |
|                           | Ar  | 4.8       | 4.7     | 4.1     | 4.8     | 4.8     | 4.2     | 4.7     | 4.0     | 4.0     |     |
| PARTIAL SCORE             |     | 4.0/5     | 4.4/5   | 3.3/5   | 4.5/5   | 4.0/5   | 3.3/5   | 4.0/5   | 3.3/5   | 3.3/5   |     |
| G                         | M   | 4.3       | 4.7     | 4.0     | 4.7     | 4.2     | 4.1     | 4.8     | 4.0     | 4.0     |     |
| PARTIAL SCORE             |     | 4.3/5     | 4.7/5   | 4.0/5   | 4.7/5   | 4.2/5   | 4.1/5   | 4.8/5   | 4.0/5   | 4.0/5   |     |
| I                         | Cs  | 4.8       | 4.2     | 3.2     | 4.2     | 4.7     | 3.5     | 3.5     | 3.3     | 3.3     |     |
|                           | Fc  | 4.1       | 4.0     | 1       | 4.0     | 4.1     | 4.0     | 4.0     | 3.4     | 3.4     |     |
| PARTIAL SCORE             |     | 4.5/5     | 4.1/5   | 2.1/5   | 4.1/5   | 4.4/5   | 3.8/5   | 3.8/5   | 3.4/5   | 3.4/5   |     |
| E                         | Sa  | 4.9       | 4.3     | 2.1     | 4.2     | 4.8     | 3.1     | 4.2     | 2.2     | 2.1     |     |
| PARTIAL SCORE             |     | 4.9/5     | 4.3/5   | 2.1/5   | 4.2/5   | 4.8/5   | 3.1/5   | 4.2/5   | 2.2/5   | 2.1/5   |     |
| TOTAL SCORE               |     | 4.2/5     | 4.2/5   | 3.1/5   | 4.1/5   | 4.1/5   | 3.8/5   | 4.1/5   | 3.3/5   | 3.2/5   |     |



### 5.5.3 Valutazione comparativa dei prodotti della Matrice-forma (CLaMtf)

Le matrici in polimero destinate alla formatura superficiale del calcestruzzo rappresentano componenti tecnologici di tipo temporaneo, ma di notevole importanza nella definizione della qualità finale dell'opera. Nel contesto del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), tali matrici svolgono un ruolo fondamentale nel garantire la precisione geometrica e la continuità materica dei canali in calcestruzzo, influenzando sia l'efficacia dello scambio termico sia le condizioni di durabilità e ispezionabilità del sistema. Essendo elementi non permanenti, la loro valutazione si concentra su requisiti prestazionali legati alla lavorabilità, alla ripetibilità d'uso e alla qualità del risultato finale del getto (*Schema 5.5*).

L'analisi delle quattro tipologie considerate – PLaMtf\_02, PLaMtf\_03, PLaMtf\_04 e PLaMtf\_05 – è stata condotta secondo le classi della UNI 8289:1981 effettivamente pertinenti: Sicurezza, Fruibilità, Aspetto, Gestione, Integrabilità e Salvaguardia dell'ambiente.

Dal punto di vista della Sicurezza, le prestazioni risultano differenziate, con valori compresi tra circa 2.1/5 e 3.6/5. Le matrici in poliuretano elastomerico (PLaMtf\_04 e PLaMtf\_05) raggiungono i punteggi più elevati ( $\approx 3.4$ – $3.6/5$ ), grazie alla maggiore resistenza meccanica e alla stabilità dimensionale durante il getto. Le matrici in EPS (PLaMtf\_02) evidenziano invece valori inferiori ( $\approx 2.1/5$ ), risultando più sensibili alle deformazioni e alle sollecitazioni.

La Fruibilità rappresenta la classe più significativa per questa tipologia di prodotto, con valori compresi tra 2.3/5 e 4.3/5. Le matrici leggere in EPS e HIPS, in particolare la PLaMtf\_02 ( $\approx 4.3/5$ ), si distinguono per facilità di taglio, adattabilità e rapidità di posa. Le soluzioni in poliuretano, più robuste ma anche più pesanti, mostrano valori inferiori ( $\approx 3.0/5$  per PLaMtf\_04 e  $\approx 2.3/5$  per PLaMtf\_05), a causa della maggiore complessità di manipolazione.

Il requisito dell'Aspetto assume un ruolo centrale, con punteggi che variano tra 3.25/5 e 4.5/5. Le matrici in poliuretano (PLaMtf\_04 e PLaMtf\_05) garantiscono la migliore qualità superficiale (4.5/5), con finiture regolari e continue. I modelli in EPS e HIPS presentano prestazioni leggermente inferiori ( $\approx 3.25$ – $3.75/5$ ), dovute a una minore definizione dei dettagli e alla presenza di giunzioni visibili.

In termini di Gestione, si osserva una chiara differenziazione tra le soluzioni: i punteggi variano da 2.5/5 a 4.5/5. Le matrici in poliuretano, riutilizzabili più volte, raggiungono i valori più elevati (fino a 4.5/5), mentre le soluzioni in EPS, generalmente monouso, si attestano su valori inferiori ( $\approx 2.5$ – $3.0/5$ ), a causa della maggiore inci-

denza dei costi di smaltimento e della minore durabilità.

La Integrabilità evidenzia valori compresi tra 3.0/5 e 4.25/5. Le matrici leggere (PLaMtf\_02) risultano più adattabili a geometrie complesse ( $\approx 4.25/5$ ), mentre le soluzioni in poliuretano, pur più precise, mostrano una minore flessibilità operativa ( $\approx 3.0-3.5/5$ ), richiedendo una maggiore pianificazione del montaggio.

Infine, la Salvaguardia dell'ambiente presenta valori tra 3.0/5 e 4.0/5. Le matrici riutilizzabili in poliuretano (PLaMtf\_04 e PLaMtf\_05,  $\approx 4.0/5$ ) risultano più sostenibili nel ciclo di vita rispetto alle soluzioni monouso, nonostante una maggiore energia incorporata iniziale. Le matrici in EPS (PLaMtf\_02 e PLaMtf\_03) si attestano su valori più bassi ( $\approx 3.0/5$ ).

Considerando il Total Score, compreso tra 3.2/5 e 3.85/5, emerge una chiara gerarchia prestazionale: la PLaMtf\_04 ( $\approx 3.85/5$ ) rappresenta la soluzione più equilibrata, seguita dalla PLaMtf\_05 ( $\approx 3.7/5$ ), mentre le soluzioni più leggere (PLaMtf\_02 e PLaMtf\_03) si collocano su livelli inferiori ( $\approx 3.2-3.4/5$ ).

In conclusione, le matrici in poliuretano costituiscono la scelta più idonea per l'impiego nel TLVS, grazie alla capacità di garantire elevata qualità superficiale, resistenza e riutilizzabilità. Le matrici leggere, pur vantaggiose in termini di rapidità esecutiva, risultano meno performanti sul piano della durabilità e della precisione del risultato, confermando la preferibilità delle soluzioni più robuste nei sistemi che richiedono continuità geometrica e controllo delle prestazioni nel tempo.

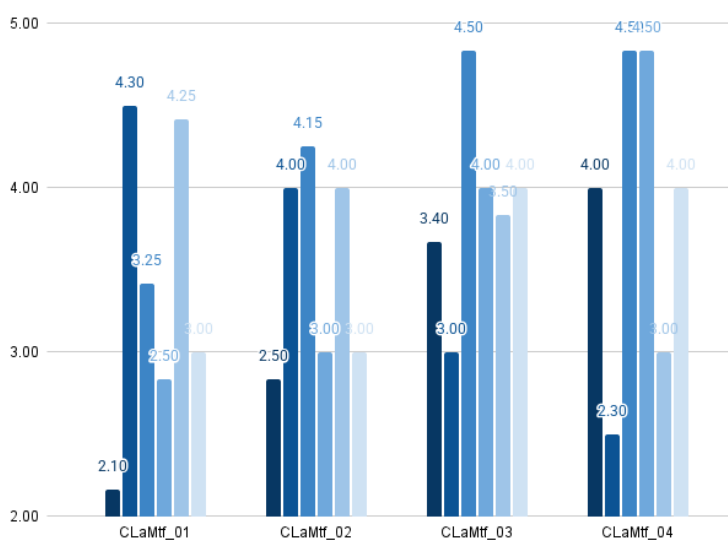


Grafico 5.3 Punteggi dei prodotti CLaMtf per criterio e punteggio totale. Fonte: K. Mitrik

Legenda:

- Sicurezza
- Flessibilità
- Aspetto
- Gestione
- Innovazione
- Salvaguardia dell'ambiente

Schema 5.5 Schema di valutazione comparativa degli elementi matrice forma per la massa termica del TLVS (CLaMtf\_01-CLaMtf\_04).  
Fonte: K. Mitrik

| MATRICI FORMA (CLaMtf)                                              |           |           |           |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                                                     | CLaMtf_01 | CLaMtf_02 | CLaMtf_03 | CLaMtf_04 |
| <b>S</b><br><br>PARTIAL SCORE →                                     | Rm        | 2.5       | 3.0       | 4.0       |
|                                                                     | Rc        | 2.5       | 3.0       | 3.5       |
|                                                                     | Ru        | 2.0       | 2.8       | 4.5       |
|                                                                     | Rf        | 1.5       | 1.5       | 2.0       |
|                                                                     | Sd        | 1.8       | 2.2       | 3.2       |
|                                                                     |           | 2.1/5     | 2.5/5     | 3.4/5     |
| <b>F</b><br>→ <b>Eq</b><br>→ I<br>→ d<br>→ p<br><br>PARTIAL SCORE → |           | 4.5       | 4.0       | 3.0       |
|                                                                     |           | 4.5       | 4.0       | 3.0       |
|                                                                     |           | 4.0       | 3.0       | 2.5       |
|                                                                     |           | 4.3/5     | 4.0/5     | 3.0/5     |
| <b>A</b><br>→ <b>C</b><br>→ Ar<br><br>PARTIAL SCORE →               |           | 3.5       | 4.0       | 4.5       |
|                                                                     |           | 3.0       | 3.5       | 4.5       |
|                                                                     |           | 3.25/5    | 3.75/5    | 4.5/5     |
| <b>G</b><br>→ <b>M</b><br><br>PARTIAL SCORE →                       |           | 2.5       | 3.0       | 4.0       |
|                                                                     |           | 2.5/5     | 3.0/5     | 4.0/5     |
| <b>I</b><br>→ <b>Cs</b><br>→ Fc<br><br>PARTIAL SCORE →              |           | 4.5       | 4.0       | 3.5       |
|                                                                     |           | 4.0       | 4.0       | 3.5       |
|                                                                     |           | 4.25/5    | 4.0/5     | 3.5/5     |
| <b>E</b><br>→ <b>Sa</b><br><br>PARTIAL SCORE →                      |           | 3.0       | 3.0       | 4.0       |
|                                                                     |           | 3.0/5     | 3.0/5     | 4.0/5     |
| <b>TOTAL SCORE</b> →                                                | 3.2/5     | 3.4/5     | 3.7/5     | 3.6/5     |

#### 5.5.4 Sistema di filtraggio aria (CLaFa)

##### 5.5.4.1 Scelta dei filtri d'aria nei TLVS.

La classificazione internazionale dei filtri per ventilazione è regolata da standard tecnici specifici, quali la norma EN 779 (ora ritirata), la più recente ISO 16890 per i filtri generali e la EN 1822/ISO 29463 per i filtri ad alta efficienza. In particolare, la EN 779:2012 classificava i filtri in categorie grossolane (G1–G4) e fini (F5–F9), mentre la ISO 16890 (2016) li organizza in base all'efficienza di filtrazione su frazioni significative di particolato atmosferico ( $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ). Tale approccio è ritenuto più rappresentativo del comportamento reale dei filtri e della loro efficacia nel migliorare la qualità dell'aria interna (Van Herreweghe, 2020). Ad esempio, un filtro F7 secondo EN 779 corrisponde a un filtro ISO  $ePM_1$  60% circa secondo ISO 16890 (REHVA, 2020).

Per applicazioni più specialistiche, la norma EN 1822 (2019) classifica i filtri ad alta efficienza (EPA, HEPA, ULPA) in base all'efficienza minima su particelle nella gamma MPPS (Most Penetrating Particle Size), in genere tra 0,1 e 0,3  $\mu m$  (AAF International, 2023). Le classi EPA (E10–E12) raggiungono un'efficienza del 95–99,5%, i filtri HEPA (H13–H14) arrivano al 99,995% e gli ULPA (U15–U17) superano il 99,9995% sul MPPS. Questi ultimi sono indispensabili in ambienti critici come camere bianche o laboratori biologici (Möritz et al., 2022).

Nel contesto edilizio e impiantistico, i filtri grossolani vengono solitamente utilizzati come prefiltri, proteggendo i componenti dell'impianto da polveri grossolane e facilitando la manutenzione (Kwon et al., 2023). I filtri medi e fini (F7–F9 o ISO  $ePM_1$  60–80%) sono considerati lo standard per applicazioni residenziali e terziarie con ventilazione meccanica, garantendo un buon bilanciamento tra qualità dell'aria e perdite di carico contenute. Tuttavia, filtri molto efficienti come gli HEPA, seppur estremamente performanti, introducono una resistenza maggiore al passaggio dell'aria e possono aumentare sensibilmente i consumi energetici (fino al +30% nei sistemi residenziali), come documentato da studi recenti (Kwon et al., 2023). Tale compromesso è particolarmente critico nei sistemi a ventilazione naturale o passiva, come i TLVS, dove le spinte motrici disponibili sono limitate. In questi casi, si privilegia l'adozione di filtri grossolani o medi, che permettono un compromesso accettabile tra efficienza di filtrazione e mantenimento delle portate d'aria. Nel presente studio sono stati selezionati prodotti rappresentativi di ciascuna tipologia filtrante – grossolani (CLaFa\_04), fini

(CLaFa\_05b) ed HEPA/EPA (CLaFa\_02 e CLaFa\_05a) – per costruire una panoramica comparativa utile a guidare le scelte progettuali. La loro analisi evidenzia che l'integrazione dei filtri nel sistema TLVS deve tenere conto del bilancio tra efficienza, caduta di pressione, durabilità, e impatto sulla qualità dell'aria. In tal senso, la massa termica del TLVS può svolgere un ruolo sinergico, migliorando l'efficienza energetica complessiva quando i flussi d'aria sono ben modulati e filtrati.

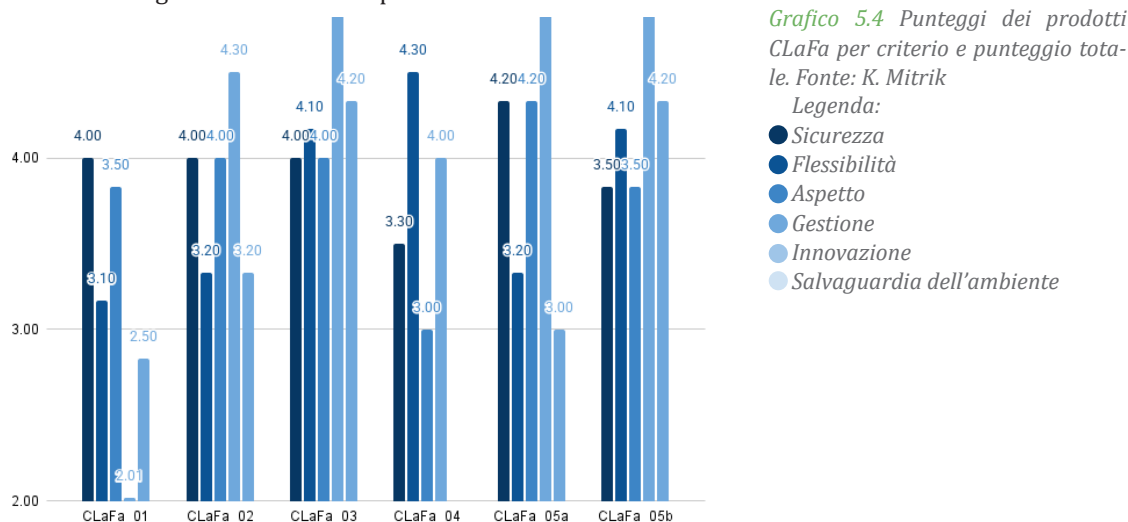
#### 5.5.4.2 Valutazione comparativa dei prodotti del Sistema di filtraggio aria (CLaFa)

All'interno del sistema TLVS, i componenti della serie CLaFa\_01–CLaFa\_05b assumono un ruolo essenziale nella fase conclusiva del trattamento dell'aria. Pur non influenzando direttamente la massa termica, i filtri costituiscono l'interfaccia critica tra la componente passiva del sistema e la qualità dell'aria percepita dagli utenti. L'analisi comparativa evidenzia valori complessivi compresi tra 3.0/5 e 4.1/5, mettendo in luce prestazioni differenziate tra le diverse tipologie (*Schema 5.6*).

Nella classe di esigenza della Sicurezza, i punteggi risultano compresi tra 2.9/5 e 4.0/5. I sistemi CLaFa\_01 e CLaFa\_02 raggiungono i valori più elevati ( $\approx 4.0/5$ ), grazie alla robustezza dei telai e alla stabilità delle medie filtranti. Le soluzioni CLaFa\_05a e CLaFa\_05b si collocano su valori intermedi ( $\approx 3.5\text{--}3.8/5$ ), mentre CLaFa\_03 e soprattutto CLaFa\_04 presentano prestazioni inferiori ( $\approx 3.6/5$  e  $2.9/5$ ), legate a una minore resistenza complessiva del sistema.

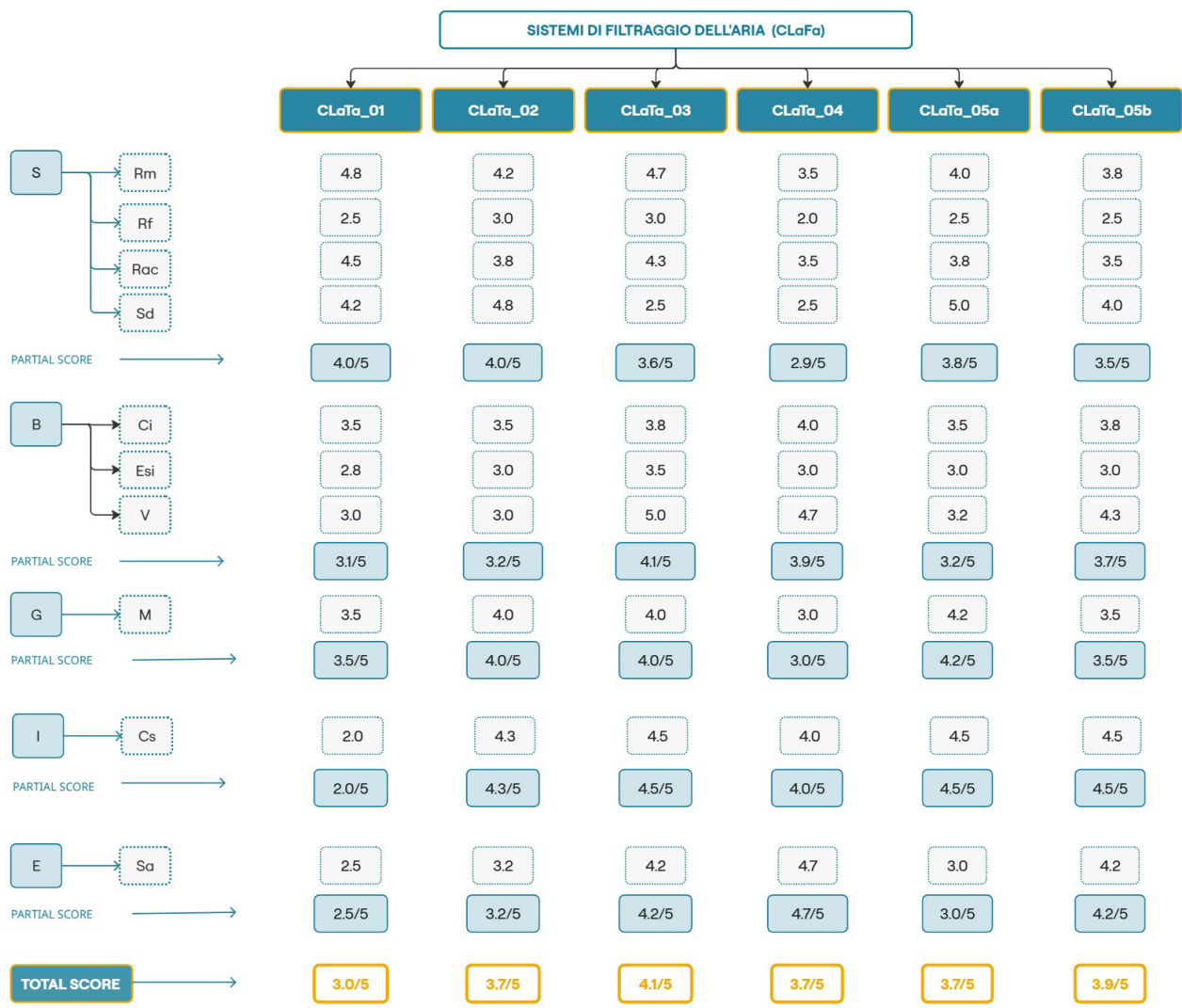
La classe di esigenza del Benessere evidenzia valori tra 3.1/5 e 4.1/5, risultando una delle più significative per questa categoria. Il sistema CLaFa\_03 raggiunge il punteggio più elevato ( $\approx 4.1/5$ ), grazie all'efficacia nella gestione del flusso e alla stabilità delle condizioni di esercizio. I modelli CLaFa\_04 e CLaFa\_05b mostrano buone prestazioni ( $\approx 3.7\text{--}3.9/5$ ), mentre CLaFa\_01 e CLaFa\_02 si attestano su valori più contenuti ( $\approx 3.1\text{--}3.2/5$ ). Le soluzioni CLaFa\_05a risultano intermedie ( $\approx 3.2/5$ ). Dal punto di vista della Gestione, i valori sono compresi tra 3.0/5 e 4.2/5. Il sistema CLaFa\_05a emerge come il più performante ( $\approx 4.2/5$ ), grazie alla facilità di manutenzione e alla durabilità. Le soluzioni CLaFa\_02 e CLaFa\_03 si attestano su valori elevati ( $\approx 4.0/5$ ), mentre CLaFa\_01 e CLaFa\_05b mostrano prestazioni intermedie ( $\approx 3.5/5$ ). Il sistema CLaFa\_04 risulta il meno performante ( $\approx 3.0/5$ ), a causa della maggiore frequenza di intervento richiesta. Per quanto riguarda l'Integrabilità, i punteggi variano tra 2.0/5 e 4.5/5, evidenziando differenze marcate tra

le soluzioni. I sistemi CLaFa\_03, CLaFa\_05a e CLaFa\_05b raggiungono i valori più elevati ( $\approx 4.5/5$ ), grazie alla compatibilità con i sistemi HVAC e alla capacità di operare con basse perdite di carico. CLaFa\_02 e CLaFa\_04 presentano buone prestazioni ( $\approx 4.0\text{--}4.3/5$ ), mentre CLaFa\_01 risulta meno integrabile ( $\approx 2.0/5$ ), configurandosi come soluzione più specifica per trattamenti localizzati. Infine, la classe di esigenza della Salvaguardia dell'ambiente mostra valori compresi tra  $2.5/5$  e  $4.7/5$ . Il sistema CLaFa\_04 ottiene il punteggio più elevato ( $\approx 4.7/5$ ), grazie alla semplicità costruttiva e alla ridotta energia incorporata. Anche CLaFa\_03 e CLaFa\_05b presentano buone prestazioni ( $\approx 4.2/5$ ), mentre CLaFa\_02 e CLaFa\_05a si collocano su valori intermedi ( $\approx 3.0\text{--}3.2/5$ ). Il sistema CLaFa\_01 evidenzia il valore più basso ( $\approx 2.5/5$ ), principalmente per la gestione dei materiali filtranti. Considerando il Total Score, emerge una gerarchia chiara: il sistema CLaFa\_03 risulta il più performante ( $\approx 4.1/5$ ), seguito da CLaFa\_05b ( $\approx 3.9/5$ ) e dalle soluzioni CLaFa\_02, CLaFa\_04 e CLaFa\_05a ( $\approx 3.7/5$ ). Il sistema CLaFa\_01 si colloca su valori inferiori ( $\approx 3.0/5$ ), evidenziando un ruolo più specifico e complementare. Nel complesso, i sistemi CLaFa\_03 e CLaFa\_05b emergono come le soluzioni più equilibrate per l'integrazione nel TLVS. I componenti CLaFa\_01 mantengono un ruolo strategico nel trattamento dei contaminanti gassosi, mentre CLaFa\_04 e CLaFa\_05a si configurano come soluzioni complementari rispettivamente per la sostenibilità e la gestione operativa. Questa articolazione conferma come la scelta dei sistemi filtranti debba essere calibrata in funzione delle specifiche condizioni di esercizio, al fine di garantire qualità dell'aria, efficienza energetica e continuità operativa del TLVS.





*Schema 5.6* Schema di valutazione comparativa degli elementi filtraggio dell'aria del TLVS (CLaFa\_01-CLaFa\_05b).  
Fonte: K. Mitrik



### 5.5.5 Valutazione comparativa dei prodotti delle membrane anti-radon per il solaio controterra nel TLVS (CLaR)

Le membrane destinate alla protezione dal gas radon rappresentano componenti tecnologici permanenti di fondamentale importanza per la qualità e la sicurezza dell'opera edilizia. Nel contesto del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), tali materiali svolgono una funzione critica: garantire la continuità della barriera al suolo e impedire la migrazione del radon verso i canali ipogei del labirinto. La loro valutazione si basa su requisiti prevalentemente prestazionali — impermeabilità ai gas, resistenza meccanica, stabilità dimensionale e qualità della posa — in quanto primo livello di protezione dell'intero sistema (*Schema 5.7*).

L'analisi comparativa delle nove soluzioni tecniche (CLaR\_01–CLaR\_06\_c) evidenzia valori complessivi relativamente omogenei, con Total Score compresi tra circa 3.3/5 e 3.9/5, a conferma di un livello prestazionale generalmente elevato ma differenziato in funzione delle specifiche tecnologie adottate.

Dal punto di vista della Sicurezza, le prestazioni risultano mediamente elevate per tutte le soluzioni, con valori compresi tra circa 3.5/5 e 4.5/5. Le membrane sintetiche multistrato (CLaR\_01 e CLaR\_03) e i sistemi fully-bonded in FPO (CLaR\_06\_c) mostrano i livelli più alti grazie alla combinazione di resistenza meccanica, stabilità dimensionale e continuità della barriera. Le membrane bituminose (CLaR\_02 e CLaR\_04) presentano prestazioni solide ma leggermente inferiori, mentre le soluzioni liquide mostrano una maggiore variabilità in funzione delle condizioni applicative.

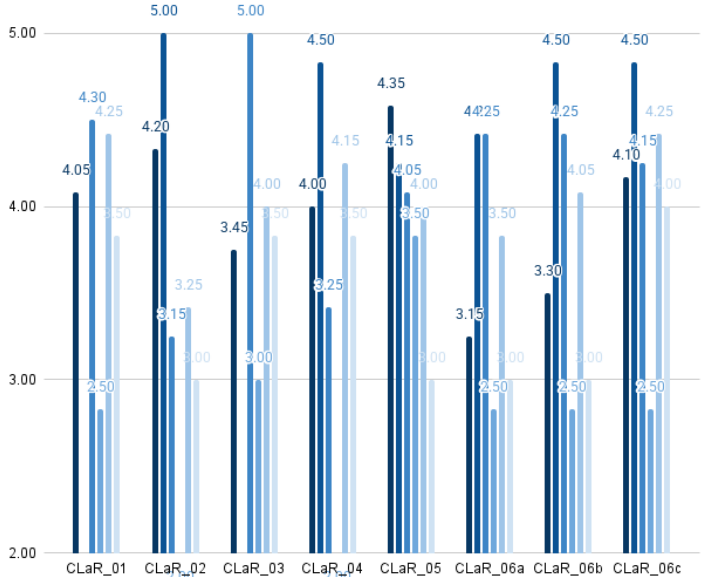
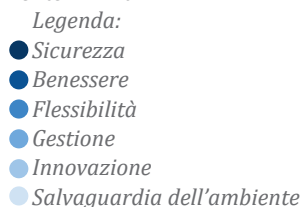
La classe del Benessere igro-ambientale, intesa come capacità di impedire la diffusione del radon e dell'umidità, evidenzia valori generalmente compresi tra 3.3/5 e 4.0/5. Le membrane con barriera metallica (CLaR\_01 e CLaR\_03) si distinguono per le migliori prestazioni, grazie alla bassissima permeabilità ai gas. Anche i sistemi fully-bonded (CLaR\_06\_c) garantiscono un comportamento molto efficace, mentre le membrane liquide e bituminose presentano valori buoni ma meno costanti.

Per quanto riguarda la Fruibilità, i punteggi variano tra circa 3.0/5 e 4.0/5, mettendo in evidenza differenze operative significative. Le membrane sintetiche leggere (CLaR\_01 e CLaR\_03) risultano tra le più semplici da installare, mentre i sistemi bituminosi (CLaR\_02 e CLaR\_04) presentano maggiori criticità legate alla posa a caldo. Le soluzioni liquide mostrano un comportamento intermedio: i sistemi applicabili manualmente sono più accessibili, mentre quelli spray richiedono attrezzature specialistiche.

In termini di Gestione, i valori si collocano mediamente tra 3.3/5 e 3.9/5. Le membrane sintetiche e i sistemi fully-bonded garantiscono una maggiore controllabilità e continuità del sistema, riducendo la necessità di interventi correttivi. Le soluzioni bituminose e liquide richiedono invece maggiore attenzione nei dettagli esecutivi e nella verifica della continuità.

La Integrabilità con il sistema TLVS mostra valori compresi tra 3.3/5 e 4.0/5. Le membrane sintetiche e i sistemi fully-bonded risultano i più compatibili con le geometrie del labirinto e con i nodi costruttivi, mentre le membrane bituminose e alcune soluzioni liquide richiedono accorgimenti aggiuntivi in presenza di discontinuità o elementi passanti. Infine, la Salvaguardia dell'ambiente evidenzia valori tra 3.3/5 e 3.9/5. I materiali sintetici leggeri e i sistemi in FPO risultano generalmente più favorevoli grazie alla durabilità e alla minore quantità di materiale impiegato. Le membrane bituminose presentano un impatto maggiore legato alla produzione e alla posa, mentre le soluzioni liquide mostrano prestazioni variabili in funzione della composizione e del ciclo di applicazione. Nel complesso, la valutazione comparativa conferma che le soluzioni più performanti si collocano su valori prossimi a 3.9/5, tra cui CLaR\_01, CLaR\_03 e CLaR\_06\_c, che rappresentano le opzioni più equilibrate per l'integrazione nel TLVS. Le restanti soluzioni (CLaR\_02, CLaR\_04, CLaR\_05\_a, CLaR\_05\_b, CLaR\_06\_a e CLaR\_06\_b) si attestano su valori compresi tra 3.3/5 e 3.7/5, risultando comunque adeguate ma con prestazioni meno omogenee rispetto ai requisiti del sistema.

*Grafico 5.5* Punteggi dei prodotti CLaR per criterio e punteggio totale.  
Fonte: K. Mitrik



*Schema 5.7 Schema di valutazione comparativa delle membrane anti-radon per il solaio controterra TLVS (CLaR).*

Fonte: K. Mitrik

|               |     | MEMBRANE ANTI-RADON(ClaR) |         |         |         |         |           |           |           |
|---------------|-----|---------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
|               |     | CLaR_01                   | CLaR_02 | CLaR_03 | CLaR_04 | CLaR_05 | CLaTa_06a | CLaTa_06b | CLaTa_06c |
| <div>S</div>  | Rm  | 4.5                       | 4.0     | 3.5     | 4.5     | 4.0     | 3.5       | 3.5       | 4.5       |
|               | Rc  | 4.0                       | 3.5     | 3.0     | 4.5     | 3.5     | 3.5       | 3.5       | 4.0       |
|               | Rt  | 4.5                       | 4.0     | 3.5     | 4.5     | 3.5     | 3.0       | 3.5       | 4.5       |
|               | Ru  | 4.0                       | 4.0     | 3.0     | 5.0     | 4.0     | 3.0       | 3.0       | 4.0       |
|               | Ra  | 3.5                       | 3.5     | 3.0     | 4.0     | 3.5     | 3.0       | 3.0       | 4.0       |
|               | Rf  | 2.5                       | 2.5     | 2.5     | 2.5     | 3.0     | 2.5       | 2.0       | 2.5       |
|               | Rac | 4.5                       | 4.0     | 4.0     | 3.5     | 4.5     | 3.5       | 3.5       | 4.0       |
|               | Rg  | 5.0                       | 4.0     | 4.5     | 3.5     | 4.5     | 3.0       | 3.0       | 4.0       |
|               | Sd  | 4.0                       | 4.0     | 4.0     | 4.0     | 4.0     | 3.5       | 3.5       | 4.5       |
| PARTIAL SCORE |     | 4.05/5                    | 3.8/5   | 3.45/5  | 4.0/5   | 3.95/5  | 3.15/5    | 3.3/5     | 4.1/5     |
| <div>B</div>  | Iac | 5.0                       | 5.0     | 5.0     | 5.0     | 5.0     | 5.0       | 5.0       | 5.0       |
|               | Pa  | 5.0                       | 5.0     | 5.0     | 4.8     | 4.0     | 4.0       | 4.5       | 4.5       |
|               | Cl  | 4.5                       | 4.5     | 4.5     | 4.3     | 2.5     | 3.5       | 4.0       | 4.0       |
|               | Esi | 5.0                       | 5.0     | 4.5     | 4.8     | 5.0     | 4.5       | 4.5       | 4.5       |
| PARTIAL SCORE |     | 4.8/5                     | 4.6/5   | 4.75/5  | 4.5/5   | 4.15/5  | 4.25/5    | 4.5/5     | 4.5/5     |
| <div>F</div>  | Eq  | I                         | 4.5     | 3.0     | 4.5     | 3.5     | 4.0       | 4.0       | 4.0       |
|               |     | d                         | 4.0     | 4.0     | 4.5     | 4.5     | 4.5       | 4.5       | 4.5       |
|               |     | p                         | 4.5     | 2.5     | 5.0     | 2.5     | 3.0       | 3.0       | 4.0       |
|               |     |                           | 4.3     | 3.15    | 4.65    | 3.25    | 3.65      | 3.85      | 4.15      |
|               |     | PARTIAL SCORE             |         | 4.3/5   | 3.15/5  | 4.65/5  | 3.25/5    | 3.65/5    | 3.85/5    |
| <div>G</div>  | M   | 2.5                       | 2.0     | 3.0     | 2.0     | 3.5     | 2.5       | 2.5       | 2.5       |
| PARTIAL SCORE |     | 2.5/5                     | 2.0/5   | 3.0/5   | 2.0/5   | 3.5/5   | 2.5/5     | 2.5/5     | 2.5/5     |
| <div>I</div>  | Cs  | 4.5                       | 3.5     | 4.0     | 4.3     | 4.0     | 3.5       | 3.8       | 4.5       |
|               | Fc  | 4.0                       | 3.0     | 4.0     | 3.2     | 4.0     | 3.5       | 3.5       | 4.0       |
| PARTIAL SCORE |     | 4.25/5                    | 3.25/5  | 4.0/5   | 3.75/5  | 4.0/5   | 3.5/5     | 3.65/5    | 4.25/5    |
| <div>E</div>  | Sa  | 3.5                       | 3.0     | 3.5     | 3.5     | 3.0     | 3.0       | 3.0       | 3.5       |
| PARTIAL SCORE |     | 3.5/5                     | 3.0/5   | 3.5/5   | 3.5/5   | 3.0/5   | 3.0/5     | 3.0/5     | 4.1/5     |
| TOTAL SCORE   |     | 3.9/5                     | 3.3/5   | 3.9/5   | 3.5/5   | 3.7/5   | 3.3/5     | 3.45/5    | 3.9/5     |

## 5.6 Conclusioni e riflessioni

Il Capitolo 5 ha rappresentato un passaggio cruciale nel percorso di ricerca, traducendo il modello teorico del TLVS in un sistema concretamente progettuale, analizzabile e implementabile.

In continuità con le basi fisiche e le evidenze sperimentali discusse nei capitoli precedenti, l'indagine ha affrontato la dimensione tecnologica e di mercato, colmando una lacuna significativa nella letteratura: l'assenza di una sistematizzazione organica delle componenti edilizie e impiantistiche che costituiscono il sistema.

La scomposizione del sistema in sottosistemi funzionali (presa d'aria, labirinto termico, superfici di scambio, sistemi di filtraggio e barriere controterra) ha reso possibile la costruzione di un quadro analitico unitario, capace di ricondurre soluzioni eterogenee a un linguaggio tecnico condiviso. Il riferimento integrato alle norme UNI 8290-1:1981 e UNI 8289:1981 ha fornito una struttura metodologica solida, rispettivamente per la classificazione tecnologica e per la valutazione prestazionale dei componenti.

Uno degli esiti più rilevanti del capitolo è la definizione di un modello di analisi comparativa basato su schede prodotto e matrici di valutazione. Questo sistema consente di integrare parametri tecnici, requisiti normativi e criteri di sostenibilità, offrendo uno strumento operativo per la selezione delle soluzioni più idonee al contesto progettuale. Le analisi hanno evidenziato come le prestazioni del TLVS siano particolarmente sensibili a variabili quali le perdite di carico, la rugosità superficiale, la stabilità igrotermica e la continuità delle barriere protettive, sottolineando il ruolo determinante di componenti caratterizzati da bassa resistenza fluidodinamica e elevata permeabilità aerodinamica.

Infine, la formalizzazione delle schede prodotto e delle matrici prestazionali trasforma l'analisi teorica in uno strumento operativo a supporto delle scelte progettuali, orientate a efficienza energetica, qualità ambientale e sostenibilità. Il capitolo si configura così come una base metodologica replicabile per la progettazione bioclimatica del TLVS.

## References

- De Toldi, T., Craig, S., & Sushama, L. (2022). Internal thermal mass for passive cooling and ventilation: Adaptive comfort limits, ideal quantities, embodied carbon. In *BUILDINGS & CITIES* (Vol. 3, Fascicolo 1, pp. 42–67). UBIQUITY PRESS LTD. <https://doi.org/10.5334/bc.156>
- Marmion, P., Pradinuk, R., Woods, A., Guity, A., Rehmanji, I., & Hydro, B. (2012). Large Dynamic Thermal Labyrinth: A Step Towards Net Zero Energy Use in Acute Care Hospitals.
- McGowan, S. (2013, luglio). Underground movement. *Ecolibrium: The Official Journal of AIRAH* (Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating). *ECOLIBRIUM*.
- Rim, M., Sung, U.-J., & Kim, T. (2018). Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption. *Energies*, 11(10), 2762. <https://doi.org/10.3390/en11102762>
- Song, S., Han Lim, J., & Hee Song, J. (2014). Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy: A case study of an educational facility in South Korea | Request PDF. [https://www.researchgate.net/publication/265909378\\_Effectiveness\\_of\\_a\\_thermal\\_labyrinth\\_ventilation\\_system\\_using\\_geothermal\\_energy\\_A\\_case\\_study\\_of\\_an\\_educational\\_facility\\_in\\_South\\_Korea?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ](https://www.researchgate.net/publication/265909378_Effectiveness_of_a_thermal_labyrinth_ventilation_system_using_geothermal_energy_A_case_study_of_an_educational_facility_in_South_Korea?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ)
- Song, S.-Y., Song, J.-H., & Lim, J.-H. (2012). Annual energy performance evaluation of thermal labyrinth ventilation system (TLVS) using measured data | Request PDF. [https://www.researchgate.net/publication/289296515\\_Annual\\_energy\\_performance\\_evaluation\\_of\\_thermal\\_labyrinth\\_ventilation\\_system\\_TLVS\\_using\\_measured\\_data?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ](https://www.researchgate.net/publication/289296515_Annual_energy_performance_evaluation_of_thermal_labyrinth_ventilation_system_TLVS_using_measured_data?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ)
- Toroxel, J. L., Silva, S. M., & Fernandes, J. (2024). Contribution of Glazed Balconies as a Passive Heating System in Contemporary Buildings in Northern Portugal. In *SUSTAINABILITY* (Vol. 16, Fascicolo 13). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su16135658>
- UNI 8289. (1981). UNI 8289:1981—UNI Ente Italiano di Normazione—Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione. Store.uni.com. <https://store.uni.com/uni-8289-1981>
- UNI 8290. (1981). UNI 8290-1:1981 + A122:1983—UNI Ente Italiano di Normazione—Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia. Store.uni.com. <https://store.uni.com/uni-8290-1-1981-a122-1983>



## References Schede Prodotti

- Beton Moulds. (n.d.). CO<sub>2</sub> nella lavorazione del calcestruzzo. <https://www.betonmoulds.com/it/co2-nella-lavorazione-del-calcestruzzo/>
- Beton Uno. (2024). Book Beton – Ottobre 2024. [https://www.beton-uno.it/edilizia/wp-content/uploads/2024/10/Book-Beton\\_-OTTOBRE-2024\\_DEF\\_doppiaPagina.pdf](https://www.beton-uno.it/edilizia/wp-content/uploads/2024/10/Book-Beton_-OTTOBRE-2024_DEF_doppiaPagina.pdf)
- Coplan S.r.l. (n.d.). Catalogo matrici. <https://www.coplan.it/catalogo-matrici/>
- Crezza S.r.l. (n.d.). Lastre e pannelli di rivestimento. <https://www.crezza.com/prodotti/lastre-pannelli-rivestimento/>
- Dörken GmbH. (n.d.). Delta Radonstop Ultra. <https://www.doerken.com/it/it/delta-radonstop-ultra>
- Edilportale. (n.d.). Green Code Thermowand – Parete prefabbricata in cemento armato. [https://www.edilportale.com/prodotti/progress/parete-prefabbricata-in-cemento-armato/green-code-thermo-wand\\_42171.html](https://www.edilportale.com/prodotti/progress/parete-prefabbricata-in-cemento-armato/green-code-thermo-wand_42171.html)
- Heidelberg Materials Italia. (n.d.). Calcestruzzi evoBuild. <https://www.heidelbergmaterials.it/it/calcestruzzi-evoBuild>
- Heidelberg Materials Italia. (n.d.). evoBuild. <https://www.heidelbergmaterials.it/it/evobuild>
- Holcim Italia. (n.d.). ECOPact. <https://www.holcim.it/31ecopact>
- Holcim Partner. (n.d.). Download tecnici. <https://www.holcimpartner.ch/it/downloads>
- Holcim Partner. (n.d.). ECOPact+. <https://www.holcimpartner.ch/it/prodotti/calcestruzzo/ecopactplus>
- Infobuild. (n.d.). IperSol – solaio in cemento armato precompresso. <https://www.infobuild.it/prodotti/ipersol-solaio-cemento-armato-precompresso-copertura-baraclit/>
- Isover Italia. (n.d.). Bituver Polimat Antiradon. <https://www.isover.it/prodotti/bituver-polimat-anti-radon>
- Kiefer Klimatechnik. (n.d.). ConcretCool – Betonkerntemperierung. <https://www.kieferklimatechnik.de/produkte-lueftung-kuehlung/betonkerntemperierung-concretcool>
- Kiefer Klimatechnik. (n.d.). Scheda tecnica ConcretCool. [https://www.kieferklimatechnik.de/fileadmin/05\\_Service/Download\\_Dokumente/Dokumente\\_Deutsch/Detailzeichnungen/12-CONCRET-COOL-Betonkerntemperierung%20mit%20Zuluft/Kieferklimatechnik\\_Detailzeichnungen\\_CONCRET-COOL.pdf](https://www.kieferklimatechnik.de/fileadmin/05_Service/Download_Dokumente/Dokumente_Deutsch/Detailzeichnungen/12-CONCRET-COOL-Betonkerntemperierung%20mit%20Zuluft/Kieferklimatechnik_Detailzeichnungen_CONCRET-COOL.pdf)
- Magnetti Building S.p.A. (n.d.). Pannelli prefabbricati: a cosa servono. <https://www.magnetti.it/pannelli-prefabbricati-a-cosa-servono/>
- Mapei S.p.A. (2023). Cube System – Brochure tecnica. [https://cdnmedia.mapei.com/docs/librarie-sprovider75/default-document-library/cube-system-1-2023--ita\\_-low.pdf](https://cdnmedia.mapei.com/docs/librarie-sprovider75/default-document-library/cube-system-1-2023--ita_-low.pdf)
- Mapei S.p.A. (n.d.). Cube System. <https://www.mapei.com/cis/it/cube-system>
- Mapei S.p.A. (n.d.). Mapeproof FBT. <https://www.mapei.com/it/it/prodotti-e-soluzioni/prodotti/dettaglio/mapeproof-fbt>

Mapei S.p.A. (n.d.). Mapeproof Liquid Membrane. <https://www.mapei.com/it/it/prodotti-e-soluzioni/prodotti/dettaglio/mapeproof-liquid-membrane>

Mapei S.p.A. (n.d.). Plastimul. <https://www.mapei.com/it/it/prodotti-e-soluzioni/prodotti/dettaglio/plastimul>

Mapei S.p.A. (n.d.). Prodotti e soluzioni. <https://www.mapei.com/it/it/prodotti-e-soluzioni>

Muroform. (n.d.). Cassaforma ondulata. <https://www.muroform.it/it/prodotti/casseforme/cassaforma-ondulato>

Muroform. (n.d.). Pannello ondulato. <https://www.muroform.it/it/prodotti/pannelli-decorativi/pannello-ondulato>

Penetron Italia. (n.d.). Archivio tecnico prodotti. <https://www.penetron.it/archivio-tecnico/prodotti>

Penetron Italia. (n.d.). Penetron Admix P P32. <https://www.penetron.it/archivio-tecnico/prodotti/penetron-admix-p-p32>

Plasmacem. (n.d.). Matrici per calcestruzzo architettonico. <https://www.plasmacem.com/it/matrici-per-il-calcestruzzo-facciavista-prefabbricato-casseri-in-cemento/cp-6-matrici-per-il-calcestruzzo-architettonico>

Prodotti e Soluzioni Index S.p.A. (n.d.). Sito ufficiale. <https://prodottiesoluzioni.indexspa.it/>

Reckli GmbH. (2023). Patternbook. [https://www.coplan.it/coplan/wp-content/uploads/2023/10/RECKLI\\_Patternbook\\_web\\_2023.pdf](https://www.coplan.it/coplan/wp-content/uploads/2023/10/RECKLI_Patternbook_web_2023.pdf)

Riweга S.r.l. (n.d.). DS 1500 Syn. <https://edilcommerce.com/sistemi-costruttivi-edilizia/sistema-tetto/riweга/899-riweга-ds-1500-syn.html>

SE Prefabbricati. (n.d.). Prefabbricati in cemento. <https://www.seprefabbricati.it/prefabbricati-cemento.html>

Sika Italia S.p.A. (n.d.). Sikalastic®-6100 FX. <https://ita.sika.com/it/edilizia/soluzioni-per-infrastrutture/impermeabilizzazione/sikalastic-6100fx.html>

Sika Italia S.p.A. (n.d.). Sikalastic®-835 I. <https://ita.sika.com/it/edilizia/impermeabilizzazioneedistruttureeinfrastrutture/impianto-trattamentoacquareflue/guaine-liquide-reattive/sikalastic-835-i.html>

Sika Italia S.p.A. (n.d.). Sikalastic®-851. <https://ita.sika.com/it/edilizia/impermeabilizzazioneedistruttureeinfrastrutture/impalcato-di-ponti/sikalastic-851.html>

Tesi System. (n.d.). Sito ufficiale. <https://www.tesisystem.it/>

Thomas Armstrong Ltd. (n.d.). Prefabbricati in calcestruzzo. <https://www.archiexpo.it/prod/thomas-armstrong/product-59901-323357.html>

Volteco S.p.A. (n.d.). Amphibia 3000 Grip. <https://volteco.com/it/prodotti/amphibia-3000-grip>

Volteco S.p.A. (n.d.). Calibro Plus Evaporation. <https://volteco.com/it/prodotti/calibro-plus-evaporation>

Volteco S.p.A. (n.d.). Eliminazione della condensa in ambienti interrati. <https://volteco.com/it/eliminazione-della-condensa-in-ambienti-interrati>

Volteco S.p.A. (n.d.). X-Lime. <https://volteco.com/it/prodotti/x-lime>

Zanon Prefabbricati. (n.d.). Pannelli prefabbricati. <https://www.zanonprefabbricati.com/it/prodotti/pannelli>



PARTE III

## COSTRUZIONE DI STRUMENTI E SIMULAZIONI PROGETTO PILOTA

#### ABSTRACT (INGLESE)

Chapter 6 represents the experimental phase of the research and applies the TLVS to the Rome Technopole pilot project, located in the Pietralata district of Rome. Simulation is adopted as a decision-making and design optimization tool: through parametric modeling and thermo-fluid dynamic analyses, different geometric and functional configurations of the system are explored in order to identify the most effective solution in relation to the Mediterranean climate and the building's summer thermal loads. Through the integration of Rhinoceros, Grasshopper, and CFD simulations based on OpenFOAM, four morphological variants of the thermal labyrinth were analyzed, assessing their fluid dynamic behavior and convective heat exchange with the thermal mass. The results show a clear correlation between spatial configuration and thermal performance. The smooth-surface solution exhibits a predominantly laminar flow, with limited air velocities and a modest temperature reduction ( $\Delta T$  approximately  $-1/-2$  °C). The introduction of zig-zag wall geometries increases turbulence and air mixing, enhancing heat exchange and leading to reductions in the range of  $-3/-4$  °C. The more complex configurations, extended to floor and ceiling surfaces, achieve the best performance: stabilized internal velocities between 4 and 5 m/s and air temperature reductions between  $-6$  and  $-8$  °C, due to the increased contact surface and prolonged air residence time within the system. Based on the optimized configuration and the specific characteristics of the site, geological conditions, thermo-physical stability of the subsoil, microclimatic data, and ventilation requirements, the TLVS was subsequently dimensioned by defining duct lengths, cross-sections, active thermal mass, and design airflow rates. This configuration was then subjected to a second phase of dynamic energy simulations to verify its impact on the building's overall energy balance. The analyses highlight the system's ability to mitigate summer peak loads, significantly reduce cooling demand, and contribute to the stabilization of indoor thermo-hygrometric comfort, transforming ventilation into a passive energy resource. Numerical validation thus confirms the technical feasibility and replicability of the TLVS in the Mediterranean tertiary sector, translating the theoretical and comparative framework developed in the previous chapters into a concrete applied demonstration supporting decarbonization and sustainable urban regeneration strategies.

## CAPITOLO 6 SIMULAZIONI COME STRUMENTO DI ANALISI: Caso pilota Rome Technopole

### ABSTRACT

Il Capitolo 6 costituisce la fase sperimentale della ricerca e applica il TLVS al caso pilota del Rome Technopole, nel quadrante urbano di Pietralata (Roma). La simulazione è assunta come strumento decisionale e di ottimizzazione progettuale: mediante modellazione parametrica e analisi termo-fluidodinamiche vengono esplorate differenti configurazioni geometriche e funzionali del sistema, con l'obiettivo di individuare la soluzione più efficace rispetto al clima mediterraneo e ai carichi termici estivi dell'edificio. Attraverso l'integrazione tra Rhinoceros, Grasshopper e simulazioni CFD basate su OpenFOAM, sono state analizzate quattro varianti morfologiche del labirinto termico, valutandone il comportamento fluidodinamico e lo scambio convettivo con la massa. I risultati mostrano una chiara correlazione tra configurazione spaziale e prestazione termica. La soluzione con superfici lisce evidenzia un flusso prevalentemente laminare, con velocità contenute e una riduzione della temperatura dell'aria limitata ( $\Delta T$  circa  $-1/-2$  °C). L'introduzione di pareti irregolari a zig-zag incrementa turbolenza e rimescolamento, migliorando lo scambio termico e portando a riduzioni nell'ordine di  $-3/-4$  °C. Le configurazioni più complesse, estese anche a pavimento e soffitto, mostrano le performance migliori: velocità interne stabilizzate tra 4 e 5 m/s e attenuazioni termiche comprese tra  $-6$  e  $-8$  °C, grazie all'aumento della superficie di contatto e del tempo di permanenza dell'aria all'interno del sistema. Sulla base della configurazione ottimizzata e delle specificità del sito, condizioni geologiche, stabilità termo-fisica del sottosuolo, dati microclimatici e fabbisogni di ventilazione, il TLVS è stato quindi dimensionato definendo lunghezze dei percorsi, sezioni dei condotti, massa termica attiva e portate d'aria di progetto. Tale assetto è stato sottoposto a una seconda fase di simulazioni energetiche dinamiche, finalizzate alla verifica dell'impatto sul bilancio energetico dell'edificio. Le analisi evidenziano la capacità del sistema di attenuare i picchi estivi, ridurre in modo significativo i carichi di raffrescamento e contribuire alla stabilizzazione del comfort termo-igrometrico interno, trasformando la ventilazione in risorsa energetica passiva. La validazione numerica conferma così la fattibilità tecnica e la replicabilità del TLVS nel settore terziario mediterraneo, traducendo l'impianto teorico e comparativo sviluppato nei capitoli precedenti in una dimostrazione applicativa concreta a supporto delle strategie di decarbonizzazione e rigenerazione urbana sostenibile.



Sistemi di raffrescamento passivi basati sulla ventilazione per edifici destinati ad usi terziari nel clima mediterraneo  
p. 362

## 6.0 Metodologia di analisi e modellazione del TLVS nel caso pilota Rome Technopole

Il presente capitolo è dedicato all'analisi del progetto del Rome Technopole, assunto come caso pilota sperimentale per la verifica applicativa delle strategie di raffrescamento passivo del TLVS. In coerenza con il quadro teorico sviluppato nei capitoli precedenti, l'obiettivo è quello di indagare il comportamento del sistema edificio in relazione alle condizioni climatiche del contesto mediterraneo, approfondendo il rapporto tra configurazione architettonica, involucro edilizio e dispositivi bioclimatici.

La metodologia adottata si basa su un approccio integrato che combina analisi qualitativa del progetto e modellazione prestazionale. In una prima fase, il caso studio viene analizzato dal punto di vista architettonico e tecnologico, attraverso la lettura delle piante e dei prospetti, al fine di individuare gli elementi progettuali rilevanti per il comportamento ambientale dell'edificio. In particolare, vengono esaminati la distribuzione funzionale, la configurazione dell'involucro, l'orientamento e l'organizzazione degli spazi, con l'obiettivo di comprendere come tali aspetti influenzino i processi di scambio termico e i meccanismi di ventilazione naturale.

Nella fase successiva, i parametri necessari alla modellazione vengono definiti a partire dall'analisi della letteratura scientifica e dal confronto con casi studio significativi relativi a sistemi di ventilazione passiva analoghi. In particolare, vengono individuati i parametri geometrici, le condizioni al contorno e le principali caratteristiche termo-fluidodinamiche sulla base di valori consolidati e validati in ambito scientifico, con specifico riferimento a contesti climatici comparabili a quello mediterraneo.

I risultati delle simulazioni sono analizzati per valutare l'efficacia del TLVS nella riduzione dei carichi di raffrescamento e nel miglioramento del comfort. I dati vengono messi in relazione con le scelte progettuali, evidenziando potenzialità e limiti del sistema e contribuendo alla validazione delle ipotesi di ricerca e alla sua possibile applicazione nel contesto mediterraneo.

## 6.1 Inquadramento generale del caso pilota

1. Le seguenti immagini fanno parte della Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024 - Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter, e il gruppo di lavoro che le ha realizzate é il seguente:

Coordinamento: Prof. Arch. Fabrizio  
 Tucci / Team: Prof. Ing. Davide  
 Astiaso Garcia; Prof. Arch. Serena  
 Baiani; Prof. Arch. Domenico  
 D'Olimpio; Prof. Ing. Giacomo  
 Falcocci; Prof. Ing. Guido Giordano;  
 Prof. Ing. Francesco Mancini; Prof.  
 Ing. Stefano Pannipani; Arch. Paola  
 Altamura; Arch. Fabrizio Amadei;  
 Arch. Stefano Capoccia; Arch.  
 Valeria Cefasasso; Arch. Caterina  
 Dalasso; Arch. Marco Giampaolletti;  
 Arch. Chiara Mastellari; Arch.  
 Kristina Mitrik; Arch. Lavinia  
 Montagner; Arch. Benedetta  
 Nastasi; Arch. Gaia Turchetti.

### 6.1.1 Inquadramento e Stato di Fatto

L'area di intervento si colloca nel quadrante di Pietralata, all'interno del Municipio IV del Comune di Roma, ambito urbano che si estende per una superficie complessiva di circa 48,94 km<sup>2</sup> e ospita una popolazione di oltre 171.000 abitanti. Il territorio si caratterizza per una significativa dotazione di spazi aperti e aree verdi, con un'estensione del verde urbano pari a circa 3,34 milioni di metri quadrati, cui si affiancano oltre 306.000 metri quadrati destinati a superfici di sosta. Dal punto di vista infrastrutturale, il quadrante presenta una posizione di primaria rilevanza strategica, risultando strettamente connesso al sistema della mobilità metropolitana e regionale.

La prossimità alla Stazione Tiburtina, uno dei principali nodi intermodali della capitale, garantisce un'elevata accessibilità sia a scala urbana sia a scala nazionale, grazie all'integrazione tra rete ferroviaria, trasporto pubblico locale e linee ad alta velocità. L'assetto territoriale è ulteriormente rafforzato dalla presenza delle principali direttrici viarie, tra cui il Grande Raccordo Anulare e l'autostrada A24, che assicurano collegamenti rapidi con il resto dell'area metropolitana e con il contesto regionale. A tali elementi si aggiunge la rete del trasporto pubblico su ferro, con la Linea B della metropolitana che contribuisce alla capillarità degli spostamenti e alla piena integrazione dell'area nel sistema urbano romano (Figura 6.1)<sup>1</sup>.

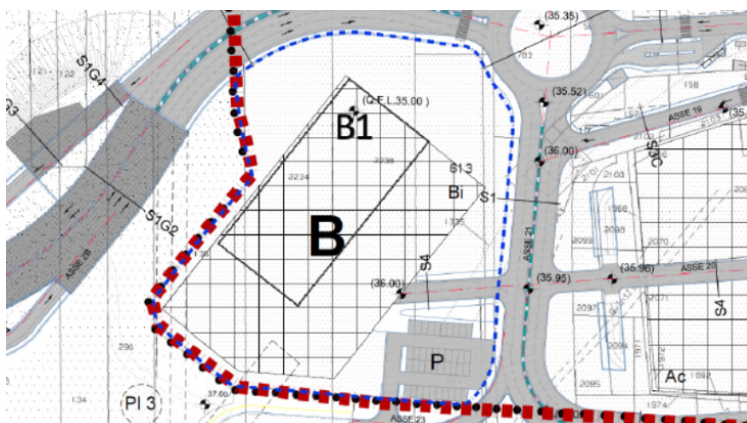
**Figura 6.1** Inquadramento territoriale dell'area Municipio IV. Fonte: Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.





In questo contesto territoriale si inserisce l'intervento del progetto del Rome Technopole (Figura 6.2), che costituisce il primo elemento attuativo previsto all'interno del Lotto B del Piano Particolareggiato di Pietralata (Figura 6.3). In relazione alla disponibilità delle risorse finanziarie, è prevista una realizzazione per fasi, a partire dal lotto B1, che costituisce il primo intervento attuativo. Tale fase comprende la costruzione dell'edificio destinato a sede della Fondazione

*Figura 6.2 - Planimetria generale  
Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.*



*Figura 6.3 Inquadramento sulla base della mappa catastale e del reticolo infrastrutturale in via di completamento con l'individuazione dell'area concessa alla fondazione Rome Technopole (B1).  
Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.*

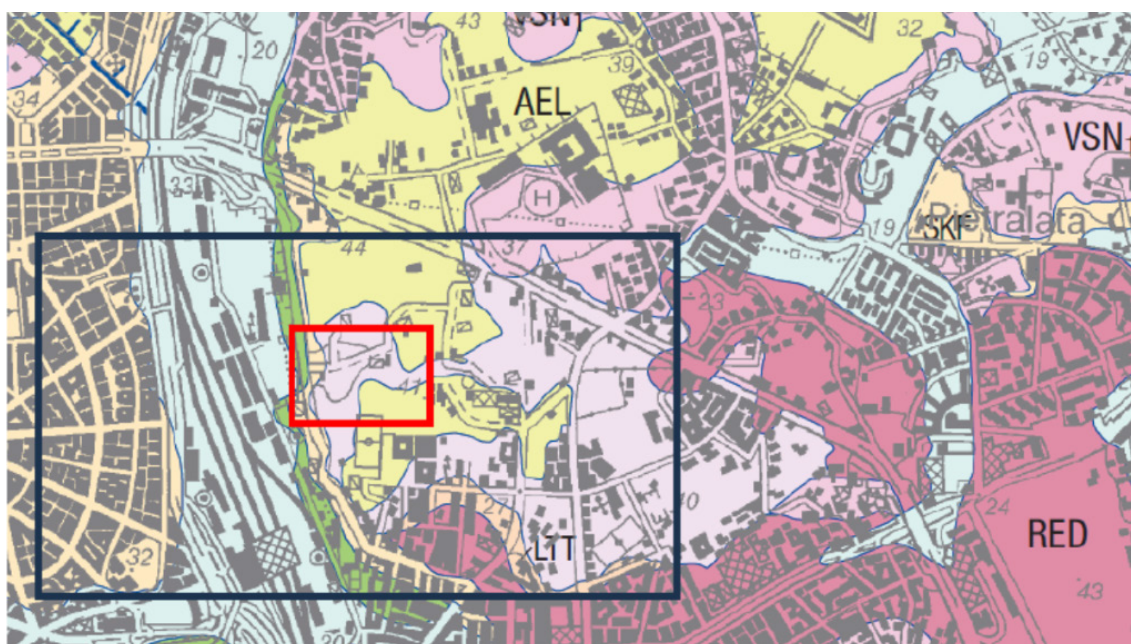


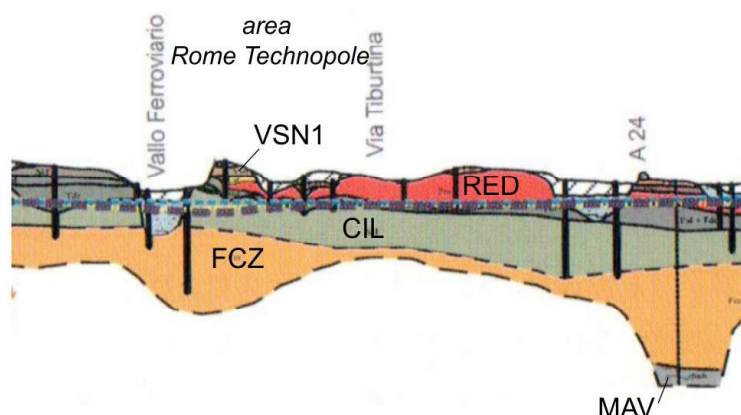
Rome Technopole, con una superficie di sedime pari a 1.127 m<sup>2</sup>, oltre alla sistemazione delle aree esterne (2.519 m<sup>2</sup>) e alla realizzazione di parcheggi a raso per una superficie complessiva di 1.010 m<sup>2</sup>. Il progetto include una riorganizzazione complessiva degli spazi esterni, progettata in continuità con l'impianto generale e con il sistema dei percorsi e degli accessi. All'interno del lotto, la mobilità è principalmente affidata a una rete di percorsi pedonali, con accesso veicolare limitato esclusivamente ai mezzi di emergenza. L'intervento privilegia infatti il rafforzamento della mobilità sostenibile, con particolare attenzione alla fruizione ciclo-pedonale, valorizzando le caratteristiche del sito e riducendo al minimo l'impatto delle infrastrutture carrabili. Queste ultime sono confinate in ambiti circoscritti, in modo da non interferire con i percorsi pedonali, garantendo al contempo maggiore sicurezza e minori effetti ambientali. Sono comunque previste alcune aree destinate alla sosta, organizzate in modo da integrare soluzioni per la mobilità elettrica e condivisa, tra cui postazioni per la ricarica dei veicoli e spazi dedicati al car sharing.

*Figura 6.4* Stralcio del Foglio 374 "Roma" della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50000 nell'Aol. Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.

### 6.1.2 Inquadramento geologico

L'area del Rome Technopole, assunta nel presente lavoro come caso pilota sperimentale, è localizzata nel quadrante di Pietralata-





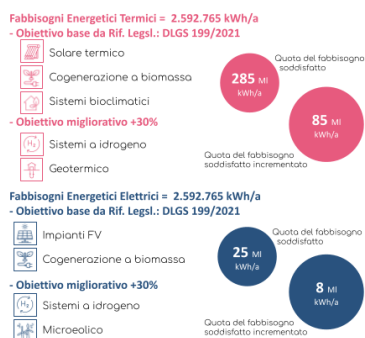
*Figura 6.5 Stralcio del Profilo idrogeologico A2 da Capelli e Mazza (2005) passante poco a sudest dell'area del Rome Technopole. La linea tratteggiata in blu indica la quota del livello piezometrico*  
Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.

ta e, secondo il Foglio 374 “Roma” della Carta Geologica d’Italia, è caratterizzata dalla presenza di litologie afferenti principalmente alla Formazione di Villa Senni (in particolare il Tufo Lionato) e alla Formazione Aurelia (Figura 6.4). Dal punto di vista stratigrafico, al di sotto di uno spessore di circa 4 metri di terreno di riporto, si sviluppa una successione di depositi pleistocenici costituita, dall’alto verso il basso, da unità piroclastiche e sedimentarie tra cui il Tufo Lionato, la successione di La Storta, le Pozzolane rosse e la Formazione di Santa Cecilia, cui si associano livelli più profondi di natura alluvionale riferibili alla Formazione del Fosso della Crescenza. Tali litologie, prevalentemente di origine vulcanica, presentano caratteristiche di significativa inerzia termica e variabile porosità, elementi particolarmente rilevanti ai fini dello scambio termico con l’aria nei sistemi ipogei. Inoltre, la presenza di una struttura tettonica locale (faglia di Monte Mario) contribuisce a influenzare la circolazione idrica sotterranea e, conseguentemente, le condizioni termo-igrometriche del sottosuolo (Figura 6.5).

### 6.1.3 Assetto urbano e spazi aperti

A scala urbana, il Tecnopolo si articola in una configurazione a corte aperta e permeabile, connessa ai principali assi infrastrutturali e caratterizzata da spazi aperti che contribuiscono al miglioramento del microclima e alla qualità ambientale complessiva. In questo quadro, il lotto B1 rappresenta il primo step attuativo e costituisce il riferimento per la sperimentazione progettuale. Gli spazi aperti assumono un ruolo attivo nelle strategie di mitigazione e adattamento climatico, grazie alla presenza di superfici permeabili, sistemi del verde e dispositivi per la gestione delle acque meteoriche, contribuendo al miglioramento del comfort ambientale.





**Schema 6.1** Schema dei fabbisogni energetici termici ed elettrici del Rome Technopole.

Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.

#### 6.1.4 Strategie integrate per la sostenibilità e l'efficienza

La progettazione bioclimatica ed energetica del Tecnopolo si configura come un processo integrato e multidisciplinare orientato al conseguimento di elevati livelli di sostenibilità ambientale ed efficienza energetica, in coerenza con il quadro teorico delineato nella presente ricerca (cfr. Capitolo 1). L'intervento si inserisce nel contesto degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030, già analizzati nel §1.2, con particolare riferimento ai temi dell'energia accessibile e pulita (SDG 7), delle città sostenibili (SDG 11) e dell'azione climatica (SDG 13). L'impostazione progettuale si basa su criteri che coinvolgono l'intero ciclo di vita dell'edificio, privilegiando materiali a basso impatto ambientale, sistemi di gestione delle acque meteoriche e strategie per la riduzione delle emissioni climalteranti. L'adozione dei criteri DNSH contribuisce a orientare l'intervento verso la minimizzazione degli impatti ambientali negativi, mentre le scelte relative alla mobilità sostenibile e alla qualità dello spazio aperto rafforzano l'integrazione tra edificio e contesto urbano. Il processo progettuale è supportato da un approccio analitico e sperimentale (cfr. §0.1), basato su analisi climatiche e simulazioni dinamiche, che consentono di definire strategie adattive in relazione alle condizioni ambientali specifiche. In tale prospettiva, il progetto è assunto come caso pilota sperimentale per la verifica applicativa del sistema TLVS.

Dal punto di vista energetico, il sistema edificio-impianto è dimensionato a partire da un fabbisogno complessivo significativo, pari a circa 2.592.765 kWh/anno sia per la componente termica sia per quella elettrica. In riferimento agli obiettivi normativi di base (D.Lgs. 199/2021), una quota rilevante di tale fabbisogno viene coperta mediante sistemi rinnovabili e soluzioni bioclimatiche, tra cui solare termico, cogenerazione a biomassa e dispositivi passivi integrati, con una copertura stimata di circa 285 MWh/anno per i fabbisogni termici e 25 MWh/anno per quelli elettrici. Il progetto prevede inoltre un incremento prestazionale pari a circa il +30%, ottenuto attraverso l'integrazione di tecnologie avanzate quali sistemi a idrogeno, geotermia a circuito aperto e microeolico, che consentono di aumentare ulteriormente la quota di fabbisogno soddisfatto, rispettivamente fino a circa 85 MWh/anno per la componente termica e 8 MWh/anno per quella elettrica (Schema 6.1).

### 6.1.5 Organizzazione planimetrica e distribuzione funzionale

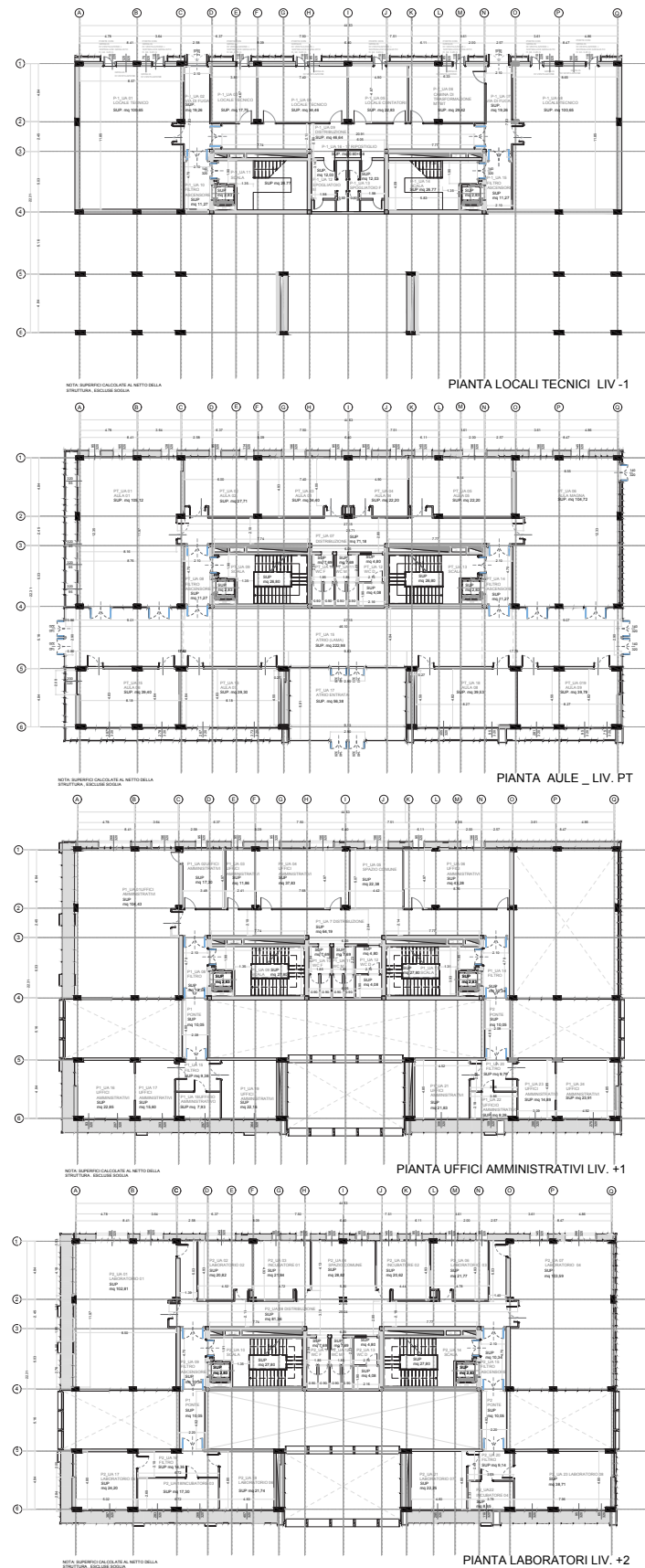
L'edificio è collocato in posizione baricentrica rispetto alla corte, in asse con il principale varco di attraversamento previsto sotto il futuro edificio-ponte del secondo lotto, configurandosi come elemento di riferimento sia dal punto di vista distributivo che urbano.

L'impianto funzionale è articolato secondo una struttura gerarchica organizzata in quattro ambiti principali: spazi collettivi e di rappresentanza, ambienti per la didattica, aree per la ricerca e il trasferimento tecnologico, e infine funzioni amministrative.

Tali ambiti non sono rigidamente separati, ma distribuiti in modo integrato su tre livelli fuori terra (incluso il piano terra), secondo una logica flessibile e modulare che consente una continua riconfigurazione degli spazi.

L'analisi delle piante (*Figura 6.6*) evidenzia come la distribuzione interna sia governata da un sistema centrale longitudinale a tutta altezza, che svolge una duplice funzione: da un lato elemento di connessione tra gli ingressi principali (sud e ovest), dall'altro spazio di relazione e permanenza. Questo asse centrale, assimilabile a una "lama" distributiva, consente una lettura chiara della volumetria e delle relazioni spaziali interne, configurandosi come nodo principale a cui si attestano i collegamenti verticali e i servizi. Al piano terra si concentrano prevalentemente le funzioni collettive e di rappresentanza, tra cui l'Aula Magna, concepita come spazio flessibile e riconfigurabile grazie all'impiego di partizioni mobili, in grado di ospitare diverse tipologie di eventi. Ai livelli superiori si sviluppano invece le funzioni didattiche e di ricerca, organizzate in ambienti altamente adattabili, seguite dalle aree amministrative collocate ai piani più alti. Dal punto di vista planimetrico, le diverse configurazioni evidenziano un'elevata flessibilità spaziale, resa possibile dall'impiego di sistemi di partizioni modulari apribili, che consentono di modulare gli ambienti in funzione delle esigenze funzionali e dei diversi scenari d'uso. Questa caratteristica risulta coerente con i principi di progettazione adattiva trattati nella presente ricerca, permettendo una gestione dinamica degli spazi e contribuendo all'ottimizzazione delle prestazioni ambientali ed energetiche.

La lettura delle piante, inoltre, evidenzia una stretta relazione tra distribuzione funzionale, sistema strutturale e strategie ambientali, in cui la configurazione degli spazi interni si integra con i dispositivi bioclimatici e con i sistemi di ventilazione naturale, costituendo una base fondamentale per l'analisi delle prestazioni del sistema edificio, anche in relazione al funzionamento del TLVS.



*Figura 6.6 Piante del progetto.  
Fonte: Fondazione Rome Technopole,  
Rome Technopole Headquarter – Re-  
lazione Tecnica Generale, Sapienza  
Università di Roma, febbraio 2024.*

### 6.1.6 Sistema di involucro e facciate

Particolare rilevanza assume il sistema di involucro, progettato in relazione all'orientamento e alle condizioni climatiche (Figura 6.7). Le facciate esposte a sud sono caratterizzate da sistemi a doppia pelle, in cui uno strato interno vetrato ad alte prestazioni è affiancato da un rivestimento esterno modulare che integra dispositivi schermanti e componenti tecnologici avanzati. Questi elementi includono superfici trasparenti e opache, pannelli fotovoltaici, materiali a cambiamento di fase (PCM) e sistemi per il guadagno solare passivo, contribuendo alla regolazione energetica dell'edificio. Le facciate orientate a nord sono invece configurate come pareti ventilate ad alte prestazioni, realizzate con materiali naturali e rivestimenti in cotto, che garantiscono adeguato isolamento termo-acustico e un corretto apporto di luce naturale attraverso aperture verticali calibrate. La differenziazione dell'involucro in funzione dell'esposizione risponde a una logica bioclimatica, ottimizzando il comportamento energetico dell'edificio.

*Figura 6.7 Prospetti del progetto.  
Fonte: Fondazione Rome Technopole,  
Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza  
Università di Roma, febbraio 2024.*



### 6.1.7 Quadro dei dispositivi passivi

Il progetto integra un sistema articolato di strategie passive finalizzate a valorizzare le condizioni climatico-ambientali del sito, attraverso l'inserimento di dispositivi tecnologici distribuiti nell'involucro edilizio secondo una logica modulare (*Schema 6.2*). Le facciate sono infatti organizzate mediante elementi di dimensione variabile (tra 0,5 e 1 m) e con sviluppo verticale pari all'altezza interpiano, consentendo un'elevata adattabilità e integrazione tra componenti differenti. Tali strategie sono principalmente integrate nell'involucro edilizio e possono essere sintetizzate come segue:

**Sistemi vetrati ad alte prestazioni:** le superfici trasparenti sono realizzate con vetri termocromici e basso emissivi selettivi, in grado di modulare dinamicamente gli apporti solari e luminosi. Questi dispositivi consentono di ridurre il surriscaldamento estivo e, al contempo, limitare le dispersioni termiche durante la stagione invernale. Componenti opache e sistemi di accumulo termico: le facciate ventilate favoriscono la dissipazione del calore attraverso moti convettivi naturali, mentre dispositivi a guadagno solare passivo, come i muri di Trombe, sfruttano l'inerzia termica per accumulare calore e rilasciarlo negli ambienti interni. I pannelli in materiali a cambiamento di fase (PCM) contribuiscono ulteriormente alla stabilizzazione delle temperature, riducendo le oscillazioni termiche.

**Dispositivi di schermatura solare:** sistemi schermanti integrati nell'involucro, in particolare nella doppia pelle, regolano l'irraggiamento diretto sulle superfici vetrate, migliorando il comportamento energetico dell'edificio e contribuendo al controllo del comfort interno. Configurazioni morfologico-spaziali bioclimatiche: l'atrio centrale a tutta altezza svolge una funzione di regolazione ambientale, favorendo l'accumulo di calore in inverno e l'attivazione della ventilazione naturale in estate. La copertura aggettante contribuisce alla protezione solare delle facciate, riducendo gli apporti radiativi nei mesi più caldi.

**Sistemi di ventilazione naturale:** il ricambio d'aria è garantito da un insieme integrato di dispositivi, tra cui condotti interrati per il pretrattamento dell'aria, intercapedini ventilate e torri di ventilazione per la distribuzione e l'espulsione dei flussi. Tali sistemi sfruttano lo scambio termico con il terreno e i moti convettivi naturali, contribuendo al controllo termo-igrometrico degli ambien-

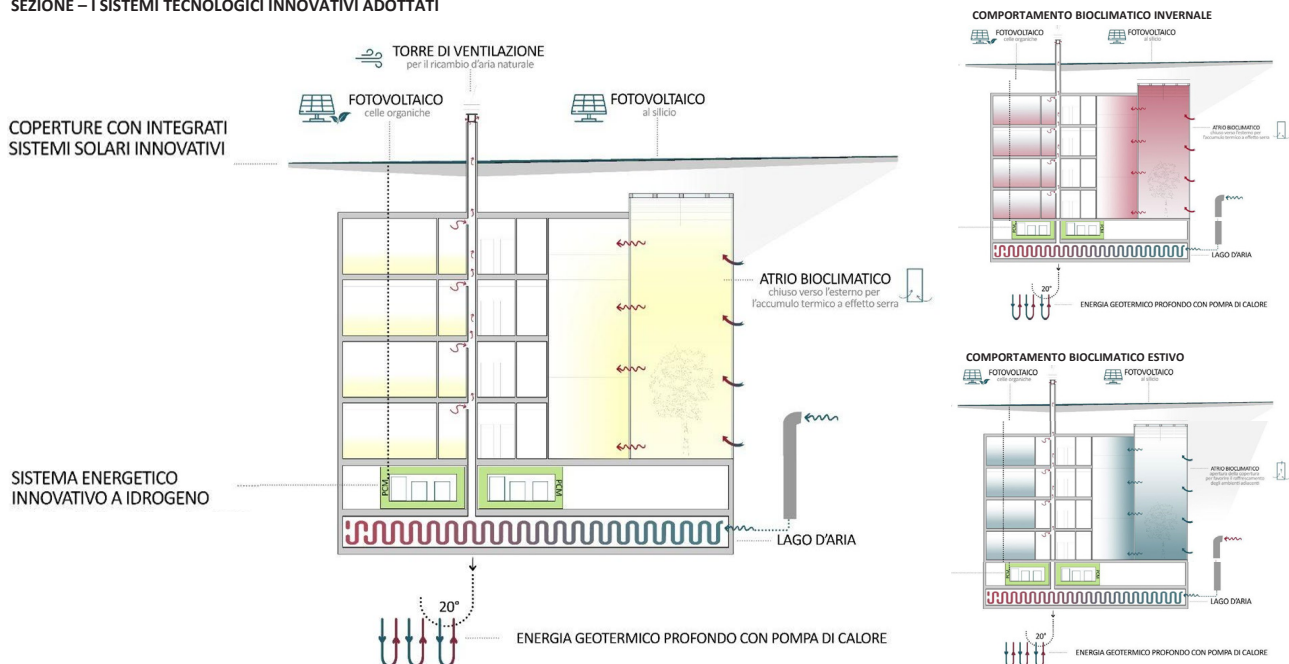
ti e risultando coerenti con i principi di funzionamento del TLVS. **Integrazione della componente vegetale:** sistemi di verde, in particolare pareti vegetate, contribuiscono alla regolazione microclimatica, alla riduzione delle temperature superficiali e al miglioramento della qualità dell'aria interna ed esterna. Sistemi sperimentali integrati in facciata: alcune porzioni dell'involucro sono concepite come superfici test, destinate all'installazione temporanea di componenti innovativi, permettendo il monitoraggio e la valutazione delle prestazioni nel tempo.

L'insieme di tali dispositivi configura un sistema passivo integrato, in cui involucro, ventilazione e componenti bioclimatici operano in modo sinergico, contribuendo alla riduzione dei fabbisogni energetici e risultando coerenti con le strategie di raffrescamento passivo analizzate nella presente ricerca.

*Schema 6.2 Schemi del funzionamento estivo ed invernale sei sistemi integrati bioclimatici. Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.*

## IL SISTEMA INTEGRATO BIOCLIMATICO-ENERGETICO: ENERGIA INNOVATIVA 100% DA RINNOVABILI + ZERO CO<sub>2</sub>

SEZIONE – I SISTEMI TECNOLOGICI INNOVATIVI ADOTTATI





## 6.2 Condizioni climatiche e microclimatiche di riferimento della zona di Pietralata, Roma

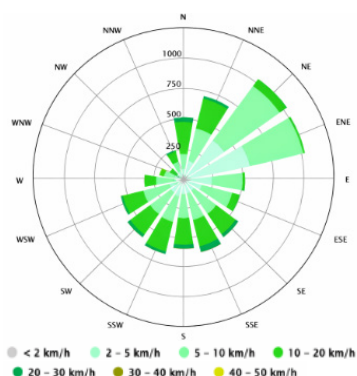
Per la presente analisi climatica si assume come periodo di riferimento l'intervallo temporale compreso tra il 2023 e il 2025. Tale finestra temporale risulta particolarmente significativa poiché include alcuni degli anni più caldi mai registrati nel continente europeo secondo i dati del Copernicus Climate Change Service (Copernicus, 2024). L'utilizzo di questo intervallo consente quindi di considerare condizioni climatiche recenti e rappresentative delle tendenze in atto, risultando particolarmente utile per valutazioni di tipo energetico e termo-ambientale nel contesto urbano.

L'area di Roma è caratterizzata da un clima mediterraneo caldo, classificato come Csa secondo il sistema Köppen-Geiger, che si distingue per la presenza di inverni miti e relativamente umidi e estati calde e tendenzialmente secche (Peel, Finlayson, McMahon, 2007). Tale configurazione climatica determina una marcata stagionalità delle variabili meteorologiche, con effetti rilevanti sulle dinamiche ambientali urbane, sui consumi energetici e sul comfort termo-igrometrico degli edifici.

### Regime anemologico

L'analisi del regime dei venti (*Figura 6.8-6.9*) relativa all'area di Pietralata evidenzia una chiara predominanza di correnti provenienti dai quadranti nord-orientali, in particolare dalle direzioni Nord-Est (NE) ed Est-Nord-Est (ENE), che risultano essere le più frequenti nel corso dell'anno.

Per quanto riguarda l'intensità, la distribuzione delle velocità del vento mostra una netta prevalenza della classe compresa tra 10 e 20 km/h, che rappresenta la condizione più ricorrente nella maggior parte dei mesi. Le velocità medie mensili possono pertanto essere generalmente collocate nell'intervallo 10-15 km/h, con un moderato incremento durante il periodo estivo. Nei mesi più caldi, infatti, le medie tendono ad avvicinarsi ai 15-18 km/h, probabilmente in relazione a una maggiore instabilità atmosferica e a gradienti termici più pronunciati.



*Figura 6.8* Diagramma della rosa dei venti (velocità media del vento e direzioni principali) della zona di Pietralata, Roma. Fonte: Meteoblue. <https://www.meteoblue.com>

Le velocità superiori a 20 km/h risultano relativamente poco frequenti, mentre gli eventi caratterizzati da vento forte oltre i 30 km/h appaiono sporadici e limitati nel tempo. Nel complesso, il sito presenta un regime anemologico caratterizzato da ventilazione generalmente debole o moderata, condizione coerente con il contesto urbano romano, dove la morfologia edilizia e la struttura urbana contribuiscono a modulare la circolazione dell'aria e la dinamica dei flussi atmosferici locali (Meteostat, 2025).

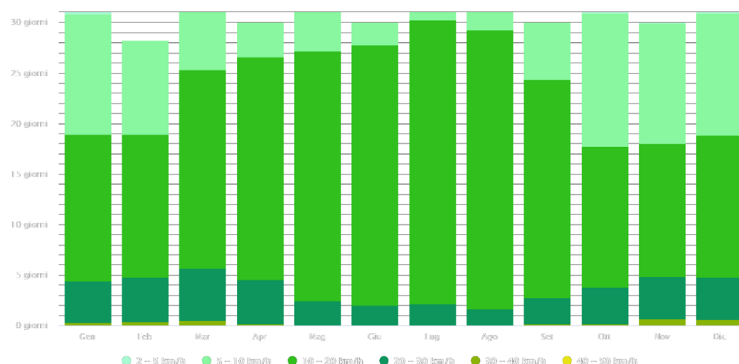


Figura 6.9 Diagramma della Velocità del vento della zona di Pietralata, Roma. Fonte: <https://www.meteoblue.com>

#### Regime delle precipitazioni

L'analisi del regime pluviometrico (Figura 6.10-6.11) per l'area di Pietralata, basata su dati modellati ERA5T, evidenzia una distribuzione delle precipitazioni fortemente stagionale, tipica del contesto climatico mediterraneo dell'Italia centrale.

Durante i mesi estivi si registra la maggiore frequenza di giornate asciutte. In particolare, nei mesi di luglio e agosto il numero di giorni senza precipitazioni può raggiungere rispettivamente 23-24 giorni/mese e oltre 21-22 giorni/mese, indicando una marcata riduzione dell'attività pluviometrica e la presenza di lunghi periodi di stabilità atmosferica. Nel corso della primavera il numero di giorni secchi rimane comunque elevato, attestandosi mediamente tra 16 e 18 giorni al mese, mentre durante il periodo autunnale si osserva un incremento significativo delle giornate caratterizzate da precipitazioni. Questo aumento è associato a una maggiore variabilità delle condizioni atmosferiche e alla frequente presenza di perturbazioni di origine mediterranea.

Il mese di novembre risulta mediamente il più piovoso, con una riduzione dei giorni asciutti fino a circa 14-15 giorni al mese.

Dal punto di vista dell'intensità, la maggior parte degli eventi pre-

precipitativi rientra nelle classi di precipitazione debole, inferiori a 2 mm o comprese tra 2 e 5 mm, che costituiscono la componente predominante durante l'intero anno. Le precipitazioni moderate, comprese tra 5 e 10 mm e 10–20 mm, risultano meno frequenti e tendono a concentrarsi soprattutto nei mesi autunnali e invernali. Gli eventi intensi, superiori a 20 mm/giorno, risultano invece relativamente rari e statisticamente marginali. I giorni con precipitazioni nevose sono sostanzialmente trascurabili, circostanza coerente con le condizioni termo-pluviometriche e con la bassa altitudine dell'area urbana romana. Nel complesso, il regime pluviometrico del sito evidenzia una netta predominanza di condizioni asciutte, con precipitazioni generalmente di bassa intensità concentrate nel semestre freddo. Tali caratteristiche assumono particolare rilevanza nella pianificazione urbana e nella gestione delle acque meteoriche e dei sistemi di drenaggio urbano (Figura 6.12-6.13).

Figura 6.10 Diagramma delle Precipitazioni (quantità) della zona di Pietralata, Roma. Fonte: <https://www.meteoblue.com>

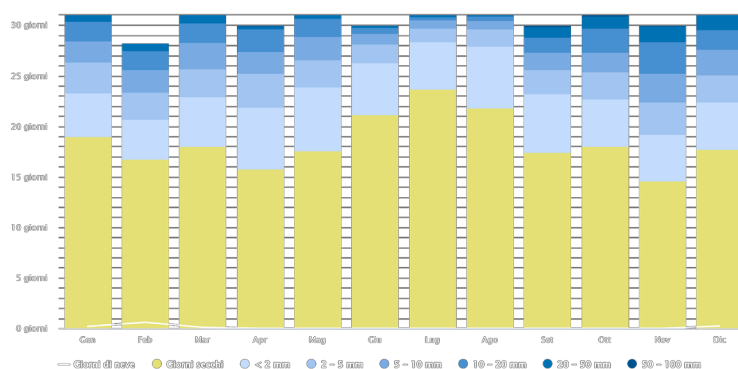
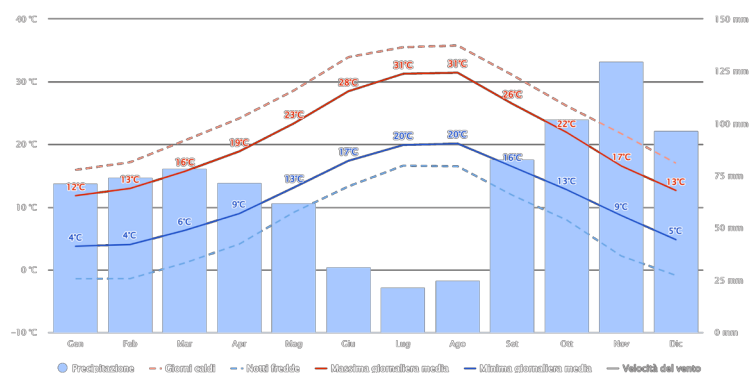


Figura 6.11 Diagramma delle Temperature medie e precipitazioni della zona di Pietralata, Roma. Fonte: <https://www.meteoblue.com>



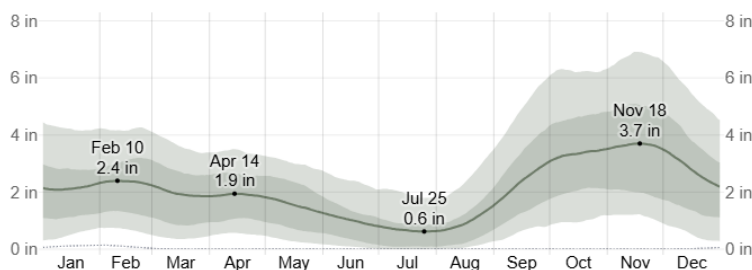


Figura 6.12 Diagramma Precipitazioni medie mensili a Roma. Fonte: Weather Spark.  
<https://weatherspark.com/>

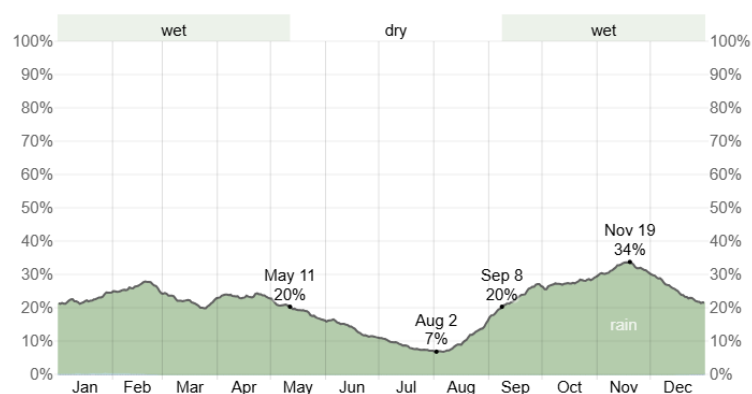


Figura 6.13 Diagramma della Probabilità giornaliera di precipitazioni a Roma. Fonte: Weather Spark.  
<https://weatherspark.com/>

#### Regime termico e temperature massime

La distribuzione delle temperature massime giornaliere (Figura 6.14), ricavata da dati modellati ERA5T, evidenzia un andamento termico fortemente stagionale e pienamente coerente con il clima mediterraneo dell'Italia centrale. Durante i mesi invernali (dicembre-febbraio) prevalgono temperature massime comprese tra 8 e 12 °C e 12 e 16 °C, con una presenza non trascurabile di giornate caratterizzate da valori inferiori a 8 °C. In questo periodo si registra anche la maggiore incidenza dei giorni di gelo, sebbene limitata a

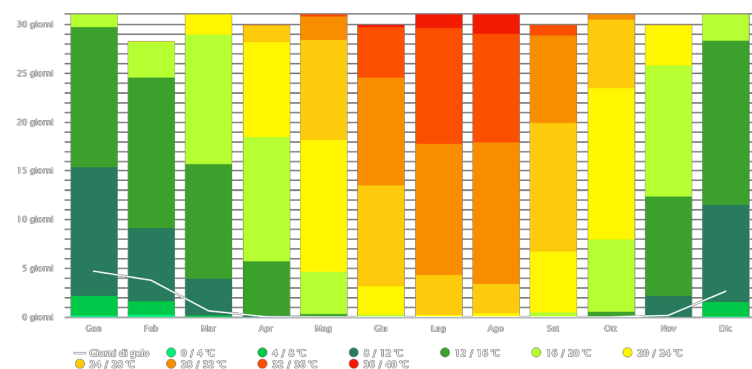
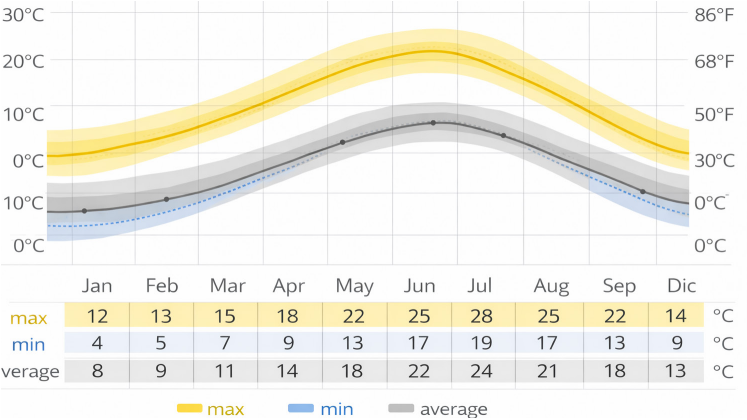


Figura 6.14 Diagramma delle Temperature massime della zona di Pietralata, Roma. Fonte: <https://www.meteoblue.com>

poche unità mensili, a conferma della rarità di condizioni termiche particolarmente rigide nel contesto urbano romano. Nel corso della primavera si osserva un progressivo incremento delle temperature, con una predominanza di valori compresi tra 16 e 24 °C. Durante i mesi estivi (giugno–agosto) il regime termico è dominato dalle classi 28–32 °C e 32–36 °C, con occasionali episodi che raggiungono o superano i 36 °C. Tali condizioni sono associate alla persistenza di situazioni anticicloniche e a un marcato aumento del carico termico. Le serie climatiche più recenti indicano che la temperatura media delle massime giornaliere nel mese di gennaio si colloca attualmente tra 13 e 14 °C, mentre nei mesi di luglio e agosto le massime medie raggiungono valori compresi tra 32 e 34 °C (ISPRA, 2025a). Durante il periodo autunnale si registra una progressiva diminuzione delle temperature massime e un aumento della variabilità intramensile, con un ritorno graduale alle condizioni termiche tipiche delle stagioni intermedie (Figura 6.15).

Figura 6.15 Diagramma della Temperatura media massima e minima a Roma. Fonte: Weather Spark. <https://weatherspark.com/>



Ondate di calore e temperature minime

Negli ultimi anni si registra un incremento significativo della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore, fenomeno che rappresenta una delle principali manifestazioni del cambiamento climatico nelle aree urbane europee. Durante questi eventi le temperature massime possono superare 38–40 °C, con effetti rilevanti sul comfort termico urbano e sul comportamento energetico degli edifici (Copernicus, 2024; WMO, 2024). Le temperature minime medie si attestano intorno a 5–6 °C nel mese di gennaio, mentre durante l'estate raggiungono valori compresi tra 19 e 21 °C (ISPRA, 2025). Parallelamente si osserva un aumento del numero di notti tropicali, definite come notti in cui la temperatura minima non scende sotto i 20 °C. In alcuni anni recenti questo

valore ha superato le 40 notti annue, evidenziando una tendenza significativa associata al riscaldamento climatico (ISPRA, 2025). L'escursione termica giornaliera media varia nel corso dell'anno: durante l'inverno si mantiene generalmente intorno ai 7–8 °C, mentre nel periodo estivo può raggiungere 13–15 °C, riflettendo l'elevata radiazione solare e la minore copertura nuvolosa.

Il periodo caratterizzato dalla maggiore limpidezza del cielo inizia approssimativamente intorno al 9 giugno e si estende per circa 3,1 mesi, fino a metà settembre. Durante questa fase prevalgono condizioni di cielo sereno o poco nuvoloso, tipiche della stagione estiva mediterranea. In particolare, luglio rappresenta il mese mediamente più sereno dell'anno, con condizioni di cielo sereno, prevalentemente sereno o solo parzialmente nuvoloso per circa l'87% del tempo. Al contrario, il periodo con maggiore copertura nuvolosa si sviluppa tra metà settembre e l'inizio di giugno, per una durata complessiva di circa 8,9 mesi. Durante questo intervallo si osserva una maggiore frequenza di cieli parzialmente o completamente coperti (Figura 6.16-6.17). Il mese che presenta il livello più elevato di nuvolosità è novembre, nel quale il cielo risulta mediamente coperto o prevalentemente nuvoloso per circa il 47% del tempo (WeatherSpark, 2024).

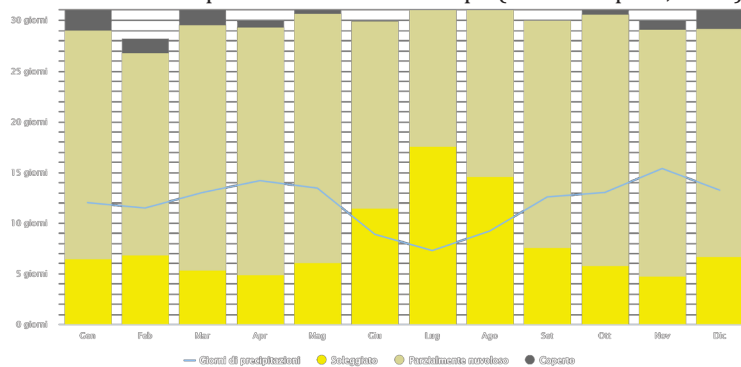


Figura 6.16 Diagramma di Nuvoloso, soleggiato, e giorni di pioggia della zona di Pietralata, Roma. Fonte: <https://www.meteoblue.com>

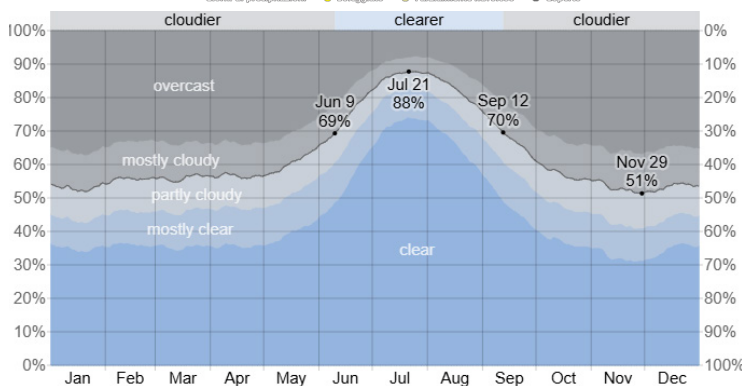


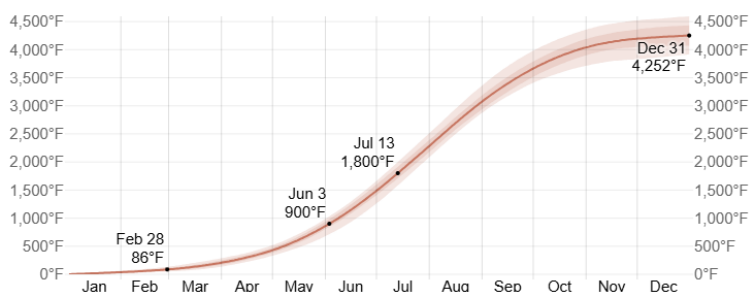
Figura 6.17 Diagramma delle Categorie di copertura nuvolosa all'aeroporto di Roma Urbe. Fonte: <https://www.meteoblue.com>



#### Gradi giorno di crescita e sviluppo stagionale della vegetazione

I gradi giorno di crescita (Figura 6.18) rappresentano un indicatore utilizzato per quantificare l'accumulo di calore nel corso dell'anno e per stimare le tempistiche di sviluppo biologico di piante e organismi viventi. Questo parametro viene calcolato considerando l'energia termica accumulata al di sopra di una determinata temperatura di base, oltre la quale i processi biologici iniziano ad attivarsi, escludendo tuttavia le temperature che superano una soglia massima oltre la quale l'accumulo di calore non produce ulteriori effetti significativi sullo sviluppo degli organismi. Nel presente caso di analisi, il calcolo dei gradi giorno di crescita è effettuato assumendo una temperatura base pari a 50 °F (circa 10 °C) e una soglia superiore di 86 °F (circa 30 °C). Sulla base di questo indicatore climatico, è possibile stimare l'inizio delle prime fasi fenologiche della vegetazione. Applicando tale metodologia al contesto climatico di Roma, si prevede che le prime fioriture primaverili si manifestino mediamente intorno al 28 febbraio. Tuttavia, a seconda della variabilità climatica annuale, questo evento può verificarsi in anticipo, raramente prima del 12 febbraio, oppure essere posticipato fino a circa il 18 marzo (WeatherSpark, 2024).

*Figura 6.18* Diagramma dei Gradi giorno in aumento all'aeroporto di Roma Urbe. Fonte: Weather Spark. <https://weatherspark.com/>



#### Umidità e condizioni di comfort igrometrico

Il livello di comfort legato all'umidità atmosferica (Figura 6.19) è generalmente valutato attraverso il punto di rugiada, parametro che indica la quantità di vapore acqueo presente nell'aria e che influisce direttamente sulla capacità del corpo umano di dissipare calore tramite l'evaporazione del sudore. Quando il punto di rugiada è basso, l'aria viene percepita come più secca e il processo di evaporazione del sudore risulta più efficace, favorendo il raffreddamento della pelle. Al contrario, valori elevati di punto di rugiada indicano una maggiore presenza di umidità nell'aria, condizione che limita l'evaporazione e genera una sensazione di afa o disagio termico. A differenza della temperatura dell'aria, che può variare sensibilmente tra il giorno e la notte, il punto di rugiada tende a modificarsi più lentamente nel corso delle 24 ore. Per questo motivo, una giornata caratterizzata da condizioni afose è spesso seguita da una notte altrettanto umida e poco confortevole, anche nel caso in cui la temperatura diminuisca. Nel contesto climatico di Roma si osservano variazioni stagionali marcate nell'umidità percepita. Il periodo più caratterizzato da condizioni afose si estende indicativamente dal 14 giugno al 2 ottobre, per una durata complessiva di circa 3,6 mesi. Durante questa fase dell'anno, condizioni percepite come afose, opprimenti o particolarmente sgradevoli si verificano per almeno il 13% del tempo. Il mese in cui si registra la maggiore frequenza di giornate afose è agosto, durante il quale si osservano mediamente circa 14 giorni con condizioni di afa significativa o superiore. Al contrario, il periodo dell'anno con il livello più basso di disagio legato all'umidità si colloca nel pieno della stagione invernale. In particolare, il 23 febbraio rappresenta mediamente il giorno meno afoso dell'anno, con condizioni di umidità percepita quasi trascurabili (WeatherSpark, 2024).

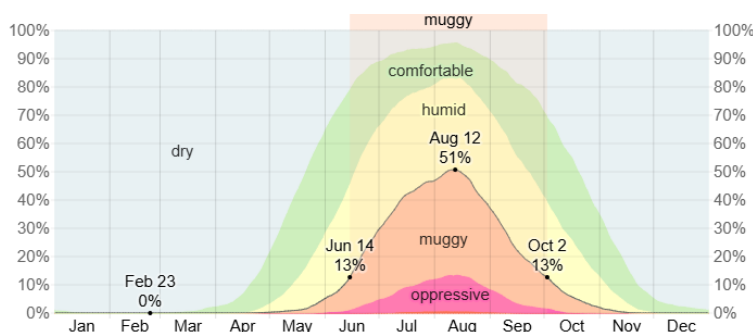


Figura 6.19 Diagramma della Temperatura media massima e minima a Roma. Fonte: Weather Spark. <https://weatherspark.com/>

### Umidità del sotto suolo

L'analisi dell'umidità del suolo (*Figura 6.20*) alla profondità di 100–200 cm nell'area di Pietralata (dati modellati NEMS – Meteoblue) evidenzia un regime igrometrico sub-superficiale relativamente stabile e caratterizzato da valori prevalentemente compresi tra 32% e 34% di contenuto idrico volumetrico. Tali condizioni indicano uno stato di umidità moderatamente elevato e coerente con l'elevata inerzia idrologica degli strati profondi, dove le oscillazioni meteorologiche di breve periodo risultano fortemente attenuate. La distribuzione spaziale appare sostanzialmente omogenea, con variazioni locali contenute e riconducibili principalmente alle caratteristiche di copertura del suolo e al grado di impermeabilizzazione urbana (Fig.n. - ). di breve periodo e una sostanziale insensibilità al ciclo diurno (Fig. n.- ).

*Figura 6.20* Diagramma della rosa dei venti (velocità media del vento e direzioni principali) della zona di Pietralata, Roma. Fonte: rielaborazione della dottoranda K. Mitrik utilizzando i dati di Meteoblue. [https://www.meteoblue.com/it/tempo/historyclimate/climatemodelled/pietralata\\_italia\\_11396191](https://www.meteoblue.com/it/tempo/historyclimate/climatemodelled/pietralata_italia_11396191)



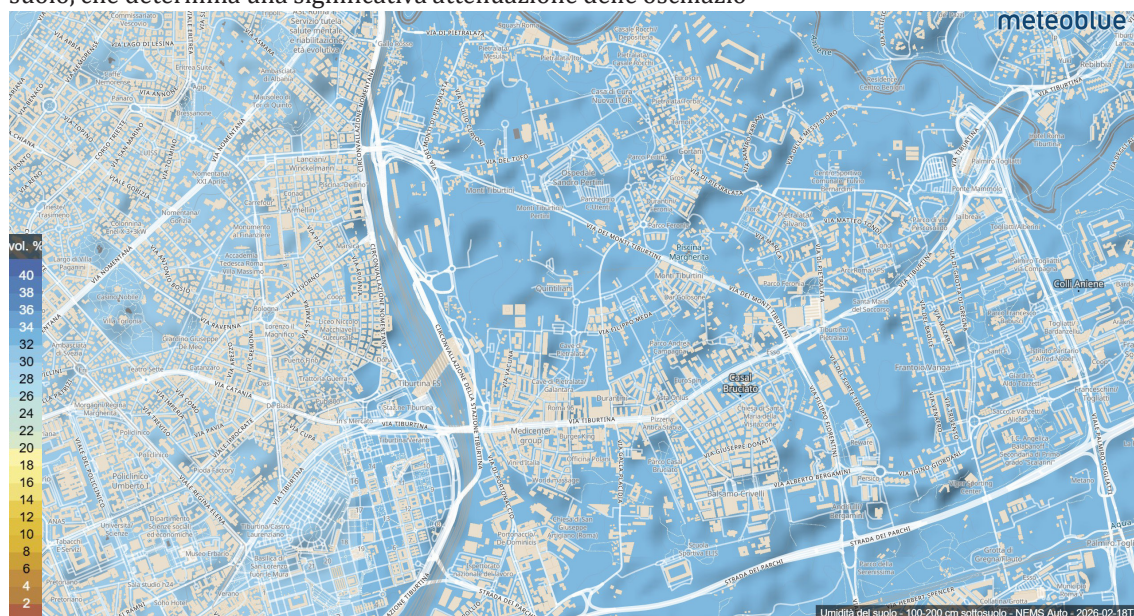


## Temperatura del sotto suolo

L'analisi della temperatura del suolo (Figura 6.21) alla profondità di 100–200 cm nell'area di Pietralata evidenzia un campo termico caratterizzato da elevata omogeneità spaziale e da una marcata stabilità, coerente con i processi di diffusione conduttiva del calore nel sottosuolo.

I valori areali risultano prevalentemente compresi nell'intervallo  $\approx 12\text{--}14^\circ\text{C}$ , con variazioni spaziali contenute e gradienti termici di modesta entità, tipici degli strati sub-superficiali a circa 2 m di profondità. Tale comportamento riflette l'elevata inerzia termica del suolo, che determina una significativa attenuazione delle oscillazio-

*Figura 6.21* Diagramma della rosa dei venti (velocità media del vento e direzioni principali) della zona di Pietralata, Roma. Fonte: rielaborazione della dottoranda K. Mitrik utilizzando i dati di Meteoblue. [https://www.meteoblue.com/it/tempo/historyclimate/climatemodelled/pietralata\\_italia\\_11396191](https://www.meteoblue.com/it/tempo/historyclimate/climatemodelled/pietralata_italia_11396191)



Nel complesso, il quadro climatico romano nel triennio 2023–2025 evidenzia una tendenza al progressivo incremento delle temperature medie e alla maggiore frequenza di eventi estremi, con una conseguente riduzione del fabbisogno di riscaldamento invernale e un incremento dei carichi di raffrescamento estivo. Tali condizioni climatiche costituiscono il contesto di riferimento per le valutazioni energetiche e termo-fluidodinamiche sviluppate nella presente ricerca, in coerenza con i dati climatici convenzionali e di progetto previsti dalla serie UNI 10349.

## 6.3 Calcolo della portata d'aria utile alla modellazione del TLVS

La determinazione della portata d'aria per la modellazione del sistema è stata condotta in coerenza con il quadro normativo illustrato nel Capitolo 1 e con le specifiche progettuali del Rome Technopole, configurandosi come passaggio fondamentale per la definizione delle condizioni al contorno delle simulazioni termo-fluidodinamiche. Dal punto di vista normativo, il dimensionamento dei flussi d'aria negli ambienti interni fa riferimento ai criteri di qualità dell'aria e ventilazione naturale definiti dalla normativa tecnica vigente (UNI EN 16798 e precedenti UNI 10339), che stabiliscono valori minimi di ricambio d'aria in funzione della destinazione d'uso (ambienti didattici, uffici e laboratori). Nel caso in esame, trattandosi di un sistema passivo integrato, la portata non è imposta da un sistema meccanico ma deriva dall'interazione tra condizioni climatiche esterne, geometria del sistema e differenze termo-pressorie, risultando quindi necessario adottare valori rappresentativi di scenari realistici di ventilazione naturale estiva.

### 6.3.1. Aerazione, ventilazione e qualità dell'aria

Nel rispetto dei requisiti di aerazione naturale diretta previsti per tutti gli ambienti suscettibili di occupazione, anche temporanea, il progetto assicura adeguati livelli di qualità dell'aria interna mediante l'adozione di sistemi di ventilazione meccanica controllata nei locali abitabili. Il dimensionamento delle portate d'aria esterna di rinnovo e di estrazione è stato effettuato in conformità alla normativa tecnica vigente, con particolare riferimento alla UNI EN 16798-1, che definisce i parametri di progetto per la ventilazione e la qualità dell'aria interna negli edifici. I valori assunti, determinati in funzione dell'affollamento, della superficie e del volume degli ambienti, sono stati considerati quali soglie minime di riferimento, al fine di garantire idonee condizioni di comfort ambientale e salubrità degli spazi interni (*Tabella 6.1*).

| Spazi Funzionali                                             | [m3/h/pers.] | [Vol/h]          |
|--------------------------------------------------------------|--------------|------------------|
| Aule didattiche, aule riunioni, aula magna spazio per studio | 25,2         | -                |
| Uffici amministrativi e incubatore                           | 40           | -                |
| Aula magna, spazio per conferenze                            | 21,6         | -                |
| Laboratori                                                   | 36           | -                |
| Spazi connettivi                                             | 40           | 0,5 (mandata)    |
| Servizi igienici                                             | -            | 810 (estrazione) |

Il sistema di distribuzione dell'aria immessa negli ambienti è progettato in modo tale da assicurare un'efficace diffusione e una corretta miscelazione del flusso all'interno dell'intero volume occupato. La disposizione dei terminali di mandata e di ripresa è stata definita considerando opportune distanze rispetto alle zone di permanenza abituale degli utenti, al fine di prevenire condizioni di discomfort localizzato o correnti d'aria percepibili. Particolare attenzione è stata inoltre rivolta al contenimento delle velocità dell'aria in corrispondenza dei dispositivi di diffusione e aspirazione, così da garantire adeguati livelli di silenziosità e comfort acustico durante l'esercizio dell'impianto. All'interno del volume convenzionalmente occupato, la velocità dell'aria viene mantenuta entro valori contenuti e comunque non superiori a 0,15 m/s, condizione ritenuta idonea per il mantenimento dell'equilibrio termo-igrometrico e del benessere degli occupanti. La salubrità dell'aria interna è assicurata non solo attraverso il corretto apporto di aria esterna, ma anche mediante l'adozione di sistemi di filtrazione adeguati, capaci di garantire un appropriato livello di purificazione del flusso trattato. La presa d'aria esterna è collocata in posizione tale da ottimizzare le condizioni di rinnovo, evitando interferenze con potenziali sorgenti di contaminazione, quali emissioni veicolari, scarichi, canne fumarie o componenti impiantistiche suscettibili di alterare la qualità dell'aria aspirata. L'insieme delle soluzioni progettuali adottate consente pertanto il soddisfacimento dei requisiti di comfort termo-igrometrico e, contestualmente, contribuisce alla riduzione del fabbisogno energetico associato ai processi di ventilazione, anche grazie all'integrazione sinergica tra strategie impiantistiche attive e dispositivi di natura passiva.

*Tabella 6.1 Riepilogo delle portate di aria esterna di rinnovo o di estrazione per ogni tipologia di spazio*  
*Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.*



### 6.3.2 Benessere termico

*Tabella 6.2 Parametri generali di progetto per il calcolo dei carichi termici invernali ed estivi.*

*Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.*

|                                                                      | Inverno  |            | Estate     |             |            |
|----------------------------------------------------------------------|----------|------------|------------|-------------|------------|
|                                                                      | Tbs [°C] | UR [%]     | Tbs [°C]   | deltaT [°C] | UR [%]     |
| Roma                                                                 | 0        | 60         | 34         | 11          | 55         |
| Aule didattiche, aula magna, aule riunioni, spazio comune per studio | 20       | 50         | 26         | -           | 50         |
| Uffici amministrativi e incubatore                                   | 20       | 50         | 26         | -           | 50         |
| Servizi igienici                                                     | 20       | non contr. | non contr. | -           | non contr. |
| Laboratori                                                           | 20       | 50         | 26         | -           | 50         |
| Spazi connettivi                                                     | 20       | 50         | 26         | -           | 50         |

progetto, impiegati come base per il calcolo dei fabbisogni energetici e per la determinazione dei carichi termici e frigoriferi degli ambienti, secondo quanto illustrato nel capitolo dedicato ai criteri di progettazione dell'impianto termico.

Le tolleranze ammesse alle grandezze termo-igrometriche degli ambienti interni sono:

temperatura  $\pm 1^{\circ}\text{C}$

umidità relativa  $\pm 5\%$

Le grandezze esposte sono atte ad assicurare il benessere termo-igrometrico nelle seguenti ipotesi:

- gli occupanti devono trovarsi in regime termo-igrometrico di equilibrio con le condizioni ambiente (periodo di permanenza maggiore di 15 minuti);
- le condizioni di benessere sono funzione dell'attività metabolica e del grado di resistenza del vestiario degli occupanti tipici (UNI 10339 - Prospetto VII) dell'attività svolta;
- la temperatura media radiante delle pareti è compresa entro un

intervallo di 4 °C rispetto al valore di progetto assunto per la temperatura a bulbo secco; inoltre non devono sussistere particolari asimmetrie tra le temperature radianti di superfici piane orientate in senso opposto.

6.3.3 Carichi termici estivi

La determinazione della potenza frigorifera di progetto deriva dalla valutazione complessiva dei diversi contributi di carico termico che interessano l'edificio. In particolare, si considerano i carichi legati all'involucro edilizio, dovuti sia ai fenomeni di trasmissione termica sia agli apporti per irraggiamento solare, insieme ai contributi interni generati dalla presenza degli occupanti, dall'illuminazione artificiale e dalle apparecchiature in uso negli ambienti. A tali componenti si aggiungono i carichi connessi al trattamento dell'aria esterna, nonché quelli derivanti dai sistemi di ventilazione e dalle perdite energetiche associate ai processi di movimentazione dei fluidi. Per quanto riguarda l'involucro, il calcolo dei carichi frigoriferi viene condotto mediante metodologie consolidate, quali il metodo delle funzioni di trasferimento (TFM) o, in alternativa, il metodo dei fattori di accumulo, in grado di tenere conto degli effetti dinamici degli scambi termici. Il contributo dovuto agli occupanti è stimato in funzione delle condizioni di massimo affollamento previste, mentre i carichi legati all'illuminazione vengono valutati in maniera cautelativa, assumendo una potenza media di riferimento applicata alle superfici climatizzate e considerando una percentuale di utilizzo contemporaneo pari all'80%, in corrispondenza delle condizioni di massimo irraggiamento solare. Analogamente, i carichi associati alle apparecchiature interne sono determinati sulla base delle potenze installate, senza applicazione di fattori di contemporaneità, assumendo per ciascuna postazione di lavoro un valore di riferimento coerente con le dotazioni tecnologiche previste.

| Carichi interni                      |                             |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| Carico per illuminazione artificiale | 20 [W/m2]                   |
| Carico per apparecchiature generiche | 50 [W/m2]                   |
| Carico per postazione di lavoro      | 300 [W/(postazione con PC)] |
| Carico metabolico sensibile          | 70 [W/persona]              |
| Carico metabolico latente            | 60 [W/persona]              |

Tabella 6.3 Intesi carichi interni per valore unitario.  
Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.

### 6.3.4 Calcolo della portata d'aria

La definizione della portata d'aria rappresenta un passaggio fondamentale per il corretto dimensionamento del sistema TLVS, in quanto consente di stabilire il fabbisogno reale di aria esterna in funzione delle caratteristiche funzionali dell'edificio e delle condizioni di utilizzo degli ambienti. A differenza delle fasi precedenti, nelle quali la portata è stata assunta come parametro di input per l'analisi parametrica, in questa fase essa viene determinata a partire dai requisiti di ventilazione degli spazi serviti, secondo un approccio coerente con le indicazioni normative e con i dati progettuali del caso studio.

Nel caso della sede del Rome Technopole, la Relazione Tecnica Generale definisce le principali destinazioni d'uso e le relative superfici, articolate in: 216 m<sup>2</sup> di aule didattiche, 72 m<sup>2</sup> di aula magna, 677 m<sup>2</sup> di laboratori, 97 m<sup>2</sup> di incubatori, 415 m<sup>2</sup> di uffici amministrativi, 332 m<sup>2</sup> di spazi comuni e 262 m<sup>2</sup> di spazi connettivi. A tali ambienti sono associate portate minime di rinnovo dell'aria differenziate in funzione dell'uso: 25,2 m<sup>3</sup>/h-persona per aule e spazi studio, 21,6 m<sup>3</sup>/h-persona per spazi conferenze, 40 m<sup>3</sup>/h-persona per uffici e incubatori, 36 m<sup>3</sup>/h-persona per laboratori, mentre per gli spazi connettivi è previsto un ricambio minimo pari a 0,5 vol/h. Poiché il progetto non esplicita il numero massimo di occupanti contemporanei, il fabbisogno di ventilazione è stato stimato a partire da coefficienti di affollamento cautelativi, coerenti con la destinazione d'uso degli ambienti. Per una stima preliminare coerente con la natura terziaria e didattico-ricerca dell'edificio, propongo il seguente criterio cautelativo:

aule didattiche: 1 persona / 1,8 m<sup>2</sup>

aula magna / conferenze: 1 persona / 1,5 m<sup>2</sup>

uffici amministrativi + incubatori: 1 persona / 10 m<sup>2</sup>

laboratori: 1 persona / 10 m<sup>2</sup>

spazi comuni / studio: 1 persona / 2,5 m<sup>2</sup>

spazi connettivi: calcolo a volume, secondo la relazione.

Su questa base, il fabbisogno di ventilazione si ricava come:

$$Q_{amb} = n \cdot q_p$$

oppure, per gli spazi connettivi:

$$Q_{amb} = ACH \cdot V$$

dove  $n$  è il numero di occupanti,  $q_p$  la portata per persona,  $ACH$  i ricambi orari e  $V$  il volume dell'ambiente.

La relazione imposta proprio questa doppia logica di calcolo, in funzione del tipo di spazio.

### Calcolo preliminare delle portate richieste

|                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Aule didattiche</b><br>Superficie totale: 216 m <sup>2</sup><br>Affollamento assunto:<br>$216/1,8=120$<br>$216/1,8=120$ persone<br>Portata specifica: 25,2 m <sup>3</sup> /h-persona<br>$Q_{aule}=120 \cdot 25,2=3024$ m <sup>3</sup> /h                 | <b>Uffici amministrativi + incubatori</b><br>Superficie totale: 415 + 97 = 512 m <sup>2</sup><br>Affollamento assunto:<br>$512/10=51,2 \approx 51$<br>$512/10=51,2 \approx 51$ persone<br>Portata specifica: 40 m <sup>3</sup> /h-persona<br>$Q_{uffici+inc}=51 \cdot 40=2040$ m <sup>3</sup> /h | <b>Spazi comuni / studio</b><br>Superficie totale: 332 m <sup>2</sup><br>Affollamento assunto:<br>$332/2,5=132,8 \approx 133$<br>$332/2,5=132,8 \approx 133$ persone<br>Portata specifica: 25,2 m <sup>3</sup> /h-persona<br>(assumendo, in prima approssimazione, l'equivalenza con "spazio per studio")<br>$Q_{spazi comuni}=133 \cdot 25,2=3351,6$ m <sup>3</sup> /h |
| <b>Aula magna / spazio conferenze</b><br>Superficie totale: 72 m <sup>2</sup><br>Affollamento assunto:<br>$72/1,5=48$<br>$72/1,5=48$ persone<br>Portata specifica: 21,6 m <sup>3</sup> /h-person<br>$Q_{aula magna}=48 \cdot 21,6=1036,8$ m <sup>3</sup> /h | <b>Laboratori</b><br>Superficie totale: 677 m <sup>2</sup><br>Affollamento assunto:<br>$677/10=67,7 \approx 68$<br>$677/10=67,7 \approx 68$ persone<br>Portata specifica: 36 m <sup>3</sup> /h-persona<br>$Q_{lab}=68 \cdot 36=2448$ m <sup>3</sup> /h                                           | <b>Spazi connettivi</b><br>Superficie totale: 262 m <sup>2</sup><br>Altezza utile: 4,20 m<br>Volume: $V=262 \cdot 4,2=1100,4$ m <sup>3</sup><br>Ricambi richiesti: 0,5 vol/h<br>$Q_{connettivi}=0,5 \cdot 1100,4=550,2$ m <sup>3</sup> /h                                                                                                                               |

### Portata totale richiesta

|                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Scenario A – TLVS a servizio dei soli ambienti principali</b><br>(aula magna, aule, laboratori, uffici/incubatori)<br>$Q_A=3024+1036,8+2040+2448=8548,8$ m <sup>3</sup> /h<br>$Q_A \approx 8550$ m <sup>3</sup> /h | <b>Scenario B – TLVS esteso anche a spazi comuni e connettivi</b><br>$Q_B=8548,8+3351,6+550,2=12450,6$ m <sup>3</sup> /h<br>$Q_B \approx 12450$ m <sup>3</sup> /h |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Ai fini della presente analisi, si assume come riferimento progettuale il primo scenario, in quanto maggiormente rappresentativo degli ambienti caratterizzati da una permanenza prolungata degli occupanti e da requisiti più stringenti in termini di qualità dell'aria e comfort termo-igrometrico. Gli spazi connettivi e parte degli spazi comuni possono infatti essere gestiti attraverso strategie integrate o sistemi complementari, mentre il TLVS si configura come sistema passivo di pretrattamento dell'aria primaria destinata agli ambienti principali. Questo valore di portata costituisce quindi il dato di base per la successiva modellazione del sistema TLVS, consentendo di verificare la coerenza tra le configurazioni geometriche analizzate nelle simulazioni CFD e il fabbisogno reale dell'edificio.

## 6.4 Concetto della fluidodinamica (computing fluid-dynamics, CFD)

1. Per ulteriori informazioni, consultare la pagina web:  
<https://www.ladybug.tools/>

2. Per ulteriori informazioni, consultare la pagina web:  
<https://trnsys.org/>

Nel presente lavoro sono stati impiegati diversi strumenti software specializzati per la sperimentazione sul TLVS (*Figura 6.22*). In particolare, la modellazione geometrica parametrica del labirinto termico e dell'edificio è stata realizzata con Rhinoceros abbinato al plugin Grasshopper, il quale ha permesso di generare modelli 3D flessibili e variare con facilità i parametri progettuali. Questo approccio ha facilitato l'ottimizzazione preliminare della configurazione del TLVS e l'integrazione con i motori di simulazione energetica – ad esempio tramite il toolkit Ladybug<sup>1</sup> Tools (Honeybee) che collega la piattaforma Grasshopper a EnergyPlus.

Le simulazioni termo-fisiche e fluidodinamiche, condotte mediante software dedicati, rappresentano un supporto fondamentale a tale approccio progettuale, in quanto consentono di orientare il processo decisionale verso il raggiungimento di prestazioni elevate attraverso analisi preventive che accompagnano l'intero sviluppo del progetto. Tali strumenti operano all'interno di un processo iterativo, basato su un dialogo continuo tra modellazione e progettazione, nel quale il progetto tecnologico-ambientale mantiene la flessibilità necessaria a recepire progressivamente i risultati delle simulazioni, adattandosi e riorientandosi anche attraverso modifiche sostanziali in corso d'opera (Tucci, 2014). Solo un approccio progettuale che ponga al centro l'analisi approfondita dei parametri climatici e ambientali, unitamente alla disponibilità di tecnologie adeguate e di un solido patrimonio di competenze tecniche, consente la realizzazione di edifici capaci di mantenere nel tempo elevate prestazioni bioclimatiche ed energetiche, garantendo al contempo alti livelli di comfort ambientale (Losasso et al., 2020).

La simulazione energetica dinamica dell'edificio e del sistema TLVS è stata condotta con DesignBuilder, interfaccia avanzata che utilizza il motore EnergyPlus per calcolare il bilancio termico orario dell'edificio [designbuilder.co.uk](http://designbuilder.co.uk). Ciò ha consentito di valutare con accuratezza le prestazioni termiche del labirinto (pre-raffreddamento estivo dell'aria di ventilazione) e i benefici sui consumi energetici, fornendo dati dettagliati su carichi termici, temperature dell'aria

di mandata e ore di comfort. Inoltre, grazie alle capacità parametriche di Grasshopper, è stato possibile implementare procedure di ottimizzazione automatizzata per individuare configurazioni progettuali del TLVS che massimizzassero l'effetto di raffrescamento passivo e il risparmio energetico.

In letteratura si riscontrano approcci analoghi con altri software per l'analisi di sistemi di ventilazione passiva o raffrescamento ipogeo. Ad esempio, TRNSYS<sup>2</sup> viene spesso utilizzato per simulare in modo transiente il comportamento energetico di edifici dotati di ventilazione a labirinto; Rim et al. (2018) hanno accoppiato simulazioni CFD ed elaborazioni in TRNSYS per valutare un TLVS ottimizzato, riscontrando una riduzione di circa il 12% del fabbisogno annuo di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio grazie al labirinto (Song et al. 2014). Poiché TRNSYS non dispone di componenti nativi per modellare direttamente un labirinto termico, in tali studi si è fatto uso di modelli surrogate o di dati di ingresso ricavati separatamente (ad esempio imponendo in TRNSYS il profilo di temperatura dell'aria all'uscita del labirinto calcolato esternamente) (Rim et al. 2018). Questi strumenti consentono di approfondire fenomeni locali (ad esempio distribuzioni di velocità e temperatura al variare della geometria) e di ottimizzare il design del TLVS sulla base di risultati ad alta risoluzione.

Anche OpenStudio merita menzione, in quanto piattaforma open-source basata su EnergyPlus utilizzata in ambito accademico per configurare modelli energetici ed eseguire simulazioni parametriche personalizzate; esso rappresenta un'alternativa libera a DesignBuilder, spesso impiegata per script di ottimizzazione o integrazioni con ambienti di programmazione. Infine, per studi che richiedono una descrizione ancora più dettagliata dei fenomeni termofisici, si può ricorrere a software multifisici come COMSOL Multiphysics, capaci di accoppiare la conduzione termica nel suolo con la convezione forzata dell'aria nel labirinto in un modello 3D completo.

Tali strumenti permettono di simulare con grande precisione il comportamento termo-fluidodinamico del sistema ipogeo, anche se il loro impiego risulta meno comune per analisi di tipo parametrico estese, a causa dell'elevato onere computazionale.

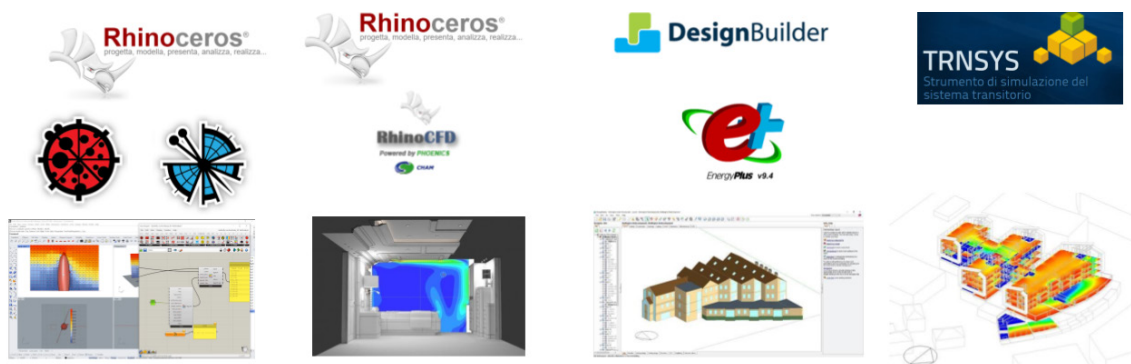
Numerosi casi studio e articoli scientifici supportano l'efficacia dell'approccio modellistico descritto e l'uso dei suddetti software in ricerche simili. Ad esempio, Song et al. (2014) hanno monitorato sul campo un TLVS installato in un edificio universitario, riscontrando che il labirinto termico è in grado di ridurre i carichi di raffrescamento estivo del 47,6% e quelli di riscaldamento invernale



del 41,2%, diminuendo proporzionalmente l'energia richiesta per il trattamento dell'aria esterna. Risultati di questo tipo, in accordo con le simulazioni effettuate, confermano come l'integrazione di modellazione parametrica (geometrica e algoritmica) e simulazione energetica dinamica rappresenti un metodo robusto e affidabile per progettare e valutare sistemi passivi di raffrescamento come il TLVS in clima mediterraneo.

*Figura 6.22 Strumenti e software utilizzati nella fase sperimentale-applicativa per la modellazione, simulazione energetica e analisi fluidodinamica del sistema di ventilazione a labirinto termico (TLVS).*

Fonte: K. Mitrik



## 6.5 Selezione dei parametri per la modellazione e le simulazioni

A partire dall'analisi della letteratura scientifica e dei casi studio presentati nel capitolo 3, paragrafo 3.3.3, è stato costruito un ampio database di parametri relativi al funzionamento e alla progettazione dei sistemi TLVS.

Tali parametri comprendono variabili di natura geometrica, termofisica, fluidodinamica, ambientale, energetica ed economica, utili per descrivere in modo completo le prestazioni del sistema.

Tuttavia, ai fini della modellazione e delle simulazioni microclimatiche mediante il plugin Butterfly (basato su OpenFOAM) all'interno dell'ambiente Rhino-Grasshopper, è stato necessario selezionare esclusivamente le variabili effettivamente rilevanti per la definizione del modello CFD e delle relative condizioni al contorno.

Di conseguenza, tra tutti i parametri individuati nella letteratura, sono stati mantenuti soltanto quelli che influenzano direttamente la geometria del sistema, le proprietà termiche dei materiali, le condizioni del terreno e le condizioni fluidodinamiche dell'aria, ossia le grandezze necessarie per definire il dominio di simulazione, le condizioni di ingresso e uscita del flusso e i processi di scambio termico tra aria, struttura e suolo.

Sono stati invece esclusi dalla fase di simulazione i parametri di tipo economico, gestionale o legati alla durabilità del sistema, in quanto non costituiscono input diretti per la modellazione CFD ma rappresentano piuttosto indicatori di valutazione successivi.

### Parametri geometrici del TLVS

- lunghezza del labirinto o del canale (m);
- larghezza e altezza del canale (m);
- spessore delle pareti (m);
- distanza tra le pareti del labirinto (cm);
- area della sezione trasversale del canale (m<sup>2</sup>);
- dimensione delle aperture di ingresso e uscita dell'aria (m<sup>2</sup>).

#### Parametri relativi al terreno

- profondità di posa del sistema (m);
- temperatura media del suolo ( $^{\circ}\text{C}$ );
- conduttività termica del terreno ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ );
- capacità termica del terreno ( $\text{MJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$ );
- umidità del suolo (%);
- tipologia di suolo e presenza della falda (booleano: sì/no).

#### Parametri fluidodinamici dell'aria

- velocità del flusso d'aria in ingresso ( $\text{m}/\text{s}$ );
- portata volumetrica dell'aria ( $\text{m}^3/\text{h}$ );
- pressione statica del flusso (Pa);
- perdite di carico nelle aperture (Pa).

#### Parametri termo-ambientali dell'aria

- temperatura dell'aria esterna in ingresso ( $^{\circ}\text{C}$ );
- umidità relativa dell'aria (%);
- umidità assoluta dell'aria ( $\text{g}/\text{kg}$ );
- pressione atmosferica di riferimento (hPa).

#### Parametri termo-fisici dei materiali del sistema

- densità del materiale delle pareti ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- capacità termica specifica del materiale ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ );
- conduttività termica delle superfici ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ );
- diffusività termica del materiale ( $\text{m}^2/\text{s}$ );
- spessore degli elementi costruttivi (m).

La selezione di questi parametri consente di definire in modo coerente il modello di simulazione e di analizzare, attraverso scenari parametrici, l'influenza delle principali variabili progettuali sulle prestazioni del sistema TLVS. In particolare, tali variabili costituiscono la base per la fase di ottimizzazione del sistema, finalizzata alla valutazione delle configurazioni geometriche e operative più efficaci in termini di ventilazione e scambio termico con il terreno.

### 6.5.1 Definizione della geometria e delle condizioni al contorno (Geometry & Boundary Conditions).

#### Fase 1.1 – Raccolta dei dati climatici per l'analisi microclimatica

Per ottenere i dati climatici relativi all'area di studio viene utilizzato il servizio EPW Map, una mappa interattiva che permette di individuare e scaricare file meteorologici nel formato EPW (EnergyPlus Weather). Questo formato contiene una serie completa di dati climatici orari relativi a un anno tipico meteorologico, comprendenti informazioni come temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità e direzione del vento, radiazione solare e copertura nuvolosa (Ladybug Tools, 2024). La piattaforma EPW<sup>3</sup> Map riunisce in un'unica interfaccia diversi database meteorologici pubblici, rendendo possibile l'accesso ai file climatici disponibili per numerose località nel mondo (Ladybug Tools, 2024). Nel caso specifico dell'analisi condotta, attraverso la mappa interattiva è stata individuata la stazione meteorologica più vicina all'area di studio, corrispondente all'aeroporto di Roma Urbe, e successivamente è stato scaricato il file climatico TMYx (Typical Meteorological Year) relativo a tale località. Questo tipo di dataset rappresenta un anno meteorologico tipico costruito a partire da serie storiche di dati climatici, e viene comunemente utilizzato nelle simulazioni energetiche e ambientali degli edifici.

Una volta individuato il file climatico, il relativo URL di download viene inserito all'interno di un panel in Grasshopper e collegato al componente LB Download Weather di Ladybug. Questo componente consente di scaricare automaticamente il file compresso contenente i dati climatici e di estrarre al suo interno i principali file meteorologici utilizzati per le simulazioni, tra cui il file .epw, il file .stat e il file .ddy (Ladybug Tools, 2022).

Successivamente, il file EPW ottenuto viene collegato al componente LB Import EPW, che permette di estrarre e organizzare i dati climatici contenuti nel file in una serie di variabili utilizzabili all'interno dell'ambiente parametrico di Grasshopper (Figura 6.23). Tra le principali informazioni disponibili si trovano la temperatura dell'aria (dry bulb temperature), la temperatura di rugiada, l'umidità relativa, la velocità e direzione del vento, la radiazione solare diretta e diffusa, la radiazione globale orizzontale, la copertura del cielo, la pressione atmosferica e la temperatura del suolo. Questi dati costituiscono la base informativa necessaria per le successive simulazioni ambientali, come l'analisi della radiazione solare, della ventilazione urbana, del comfort microclimatico e delle prestazioni energetiche degli edifici.

3. Il file EPW contiene generalmente 8760 valori orari, corrispondenti al numero totale di ore presenti in un anno, permettendo quindi di analizzare l'andamento delle variabili climatiche con una risoluzione temporale molto dettagliata (TU Delft, 2024).

## 1.1 Microclima

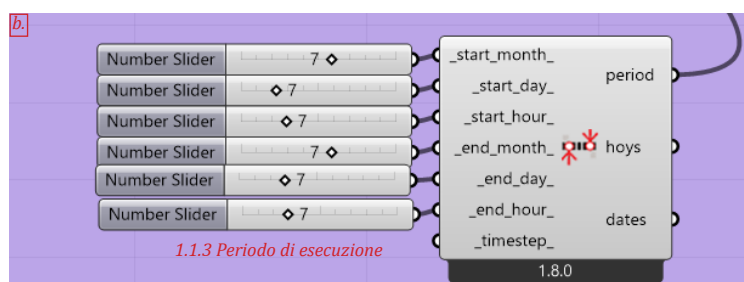
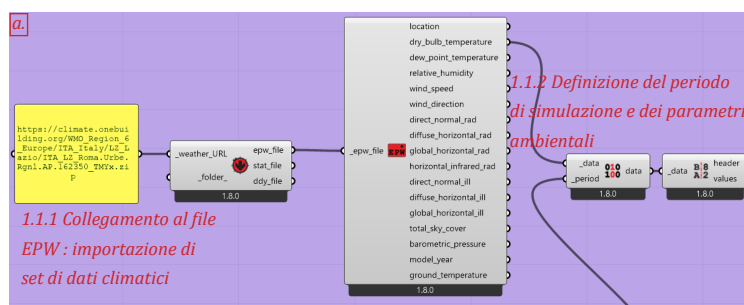
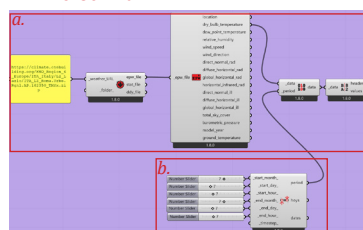
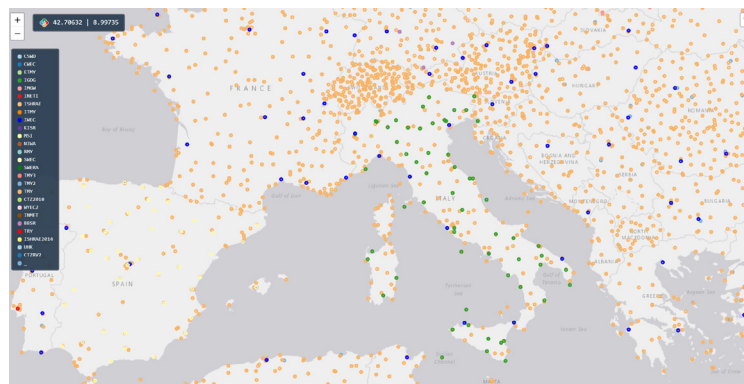


Figura 6.23 Interfaccia della piattaforma EPW Map (Ladybug Tools) utilizzata per l'individuazione e il download dei file climatici EPW (EnergyPlus Weather) relativi alle diverse stazioni meteorologiche. Fonte: <https://www.ladybug.tools/epwmap/>



Fase 1.2 – Impostazione della geometria del modello per l'analisi microclimatica

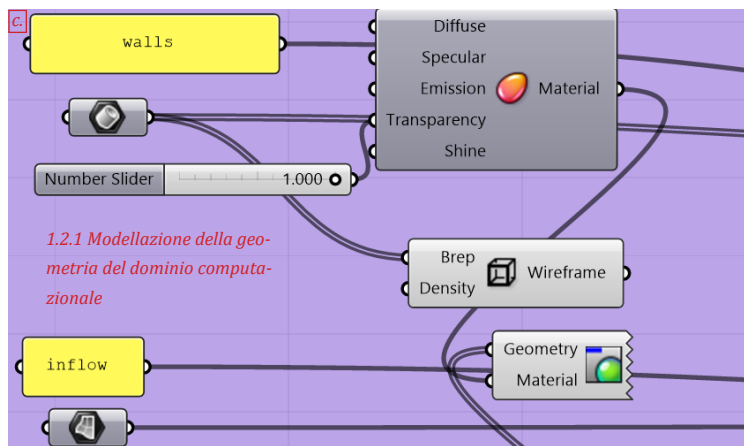
Successivamente alla fase di acquisizione dei dati climatici, il processo metodologico prevede la definizione della geometria del modello che verrà utilizzato. In questa fase vengono importati nel modello digitale gli elementi geometrici principali del contesto urbano, quali edifici, superfici di confine del dominio di simulazione e aperture per l'ingresso e l'uscita dei flussi d'aria. La geometria tridimensionale del sito viene inizialmente modellata o importata in Rhino e successivamente collegata ai componenti di Grasshopper, permettendo la gestione parametrica delle superfici e dei volumi

che compongono lo spazio urbano. All'interno dello script parametrico vengono individuate e organizzate diverse categorie di superfici, ciascuna con una specifica funzione all'interno della simulazione fluidodinamica. In particolare, vengono definite le superfici corrispondenti alle pareti e agli edifici (walls), che rappresentano gli ostacoli solidi con cui il flusso d'aria interagisce. Tali elementi vengono collegati ai componenti di Grasshopper che consentono di assegnare proprietà geometriche e materiali, utili sia per la visualizzazione sia per la definizione delle condizioni di simulazione.

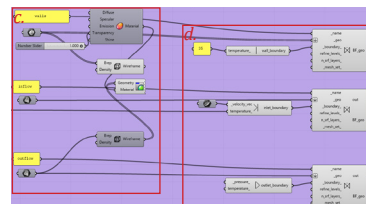
Questi ultimi definiscono i limiti del dominio computazionale all'interno del quale verrà eseguita la simulazione CFD (Computational Fluid Dynamics). Le superfici di inflow rappresentano i punti attraverso cui il vento entra nel dominio di calcolo, mentre quelle di outflow permettono la fuoriuscita del flusso, garantendo la corretta continuità della simulazione.

Attraverso l'utilizzo dei componenti di Grasshopper, le superfici geometriche vengono convertite in Brep (Boundary Representation), ovvero rappresentazioni matematiche dei solidi tridimensionali. Questo passaggio consente di preparare la geometria per le successive operazioni di discretizzazione della mesh e per l'esportazione verso il solver di simulazione utilizzato dal plugin Butterfly, che si basa sul software open-source OpenFOAM per l'analisi dei flussi d'aria (Butterfly, 2024).

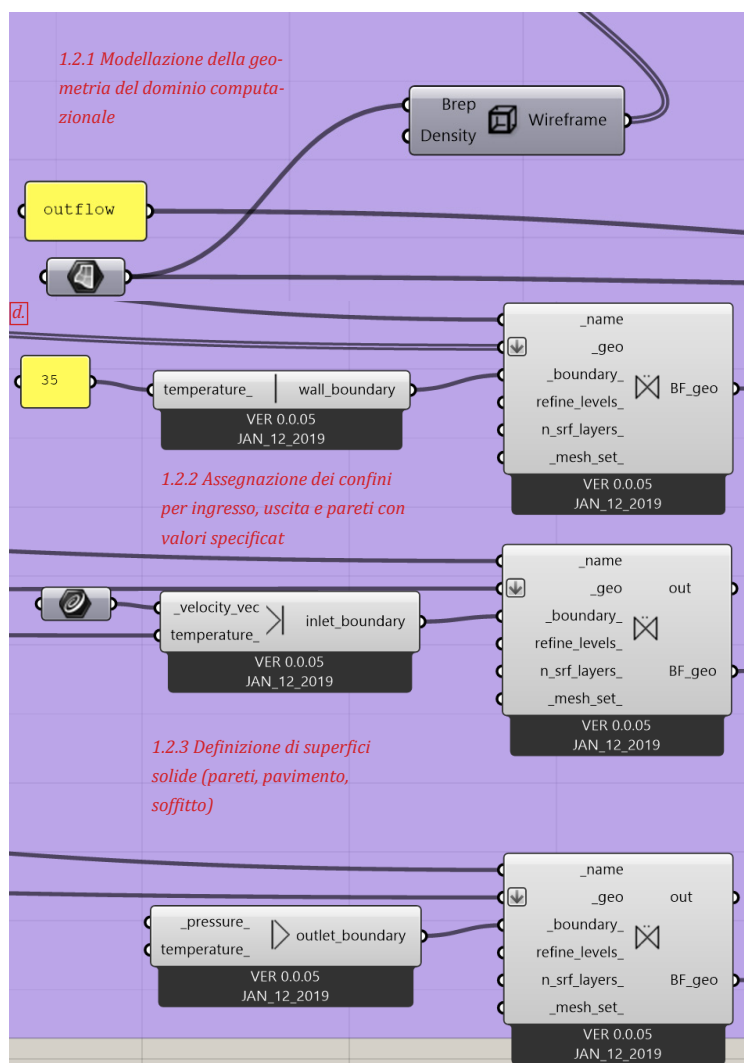
L'impostazione di condizioni al contorno uniformi ha consentito di definire un quadro sperimentale numerico controllato, nel quale l'unica variabile modificata fosse la configurazione geometrica interna. Tale scelta metodologica garantisce la robustezza del confronto tra le varianti e l'attribuzione diretta delle differenze riscontrate agli effetti morfologici.



## 1.2 Impostazione della geometria





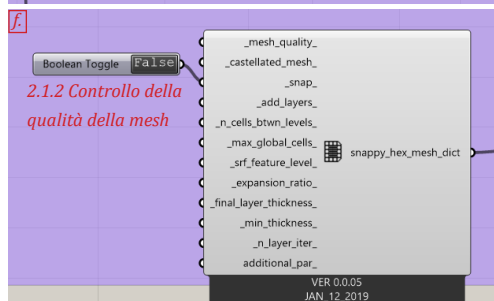
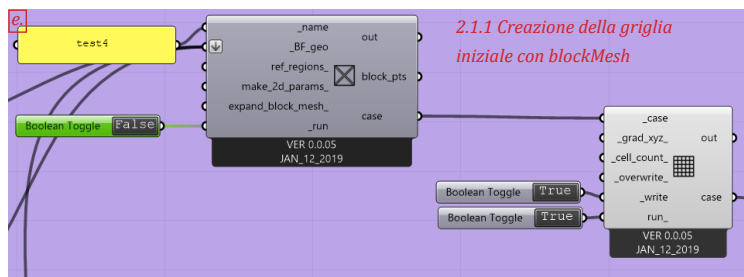


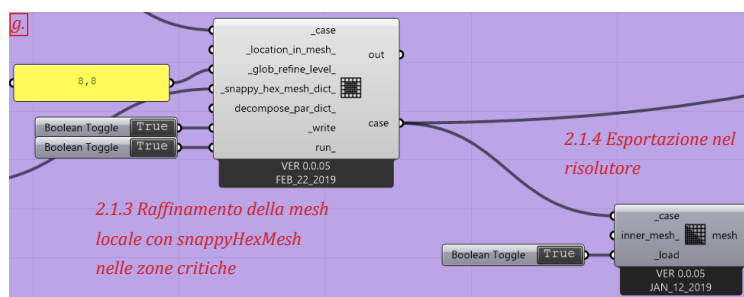
## 6.5.2 Generazione della mesh (Mesh Generation)

La discretizzazione del dominio è stata eseguita mediante una procedura conforme agli strumenti di mesh generation di OpenFOAM. In una prima fase è stata generata una griglia di base del dominio; successivamente la mesh è stata raffinata e adattata alla geometria mediante algoritmi di snapping e local refinement, con eventuale introduzione di strati limite in prossimità delle superfici solide al fine di descrivere correttamente i gradienti di velocità nelle regioni

di parete. La qualità della mesh è stata verificata attraverso il controllo dei principali indicatori numerici (non-ortogonalità, skewness, aspect ratio), in modo da garantire stabilità e affidabilità della soluzione.

La discretizzazione del dominio è stata realizzata attraverso una procedura in due fasi conforme al workflow standard di OpenFOAM. In primo luogo, la mesh di base è stata generata mediante il comando `blockMesh`, che ha permesso di definire una griglia strutturata iniziale, regolare e coerente con le dimensioni globali del dominio. Successivamente, attraverso l'utilizzo di `snappyHexMesh`, la griglia è stata adattata alla geometria reale delle superfici interne, introducendo raffinamenti locali nelle zone caratterizzate da discontinuità geometriche e nei pressi delle pareti solide. Particolare attenzione è stata posta alla rappresentazione delle regioni prossime alle superfici, dove si sviluppano gradienti significativi di velocità e temperatura. Il raffinamento locale ha consentito una descrizione più accurata degli effetti convettivi e delle interazioni fluido-superficie, specialmente nelle configurazioni irregolari "a zig-zag", dove la complessità geometrica può indurre fenomeni di ricircolo e variazioni locali del campo di moto. La qualità della mesh è stata verificata attraverso il controllo dei parametri numerici fondamentali (non-ortogonalità, skewness, aspect ratio), al fine di garantire stabilità numerica e affidabilità dei risultati.





### 6.5.3 Impostazione ed esecuzione del solutore (Solver Setup & Run)

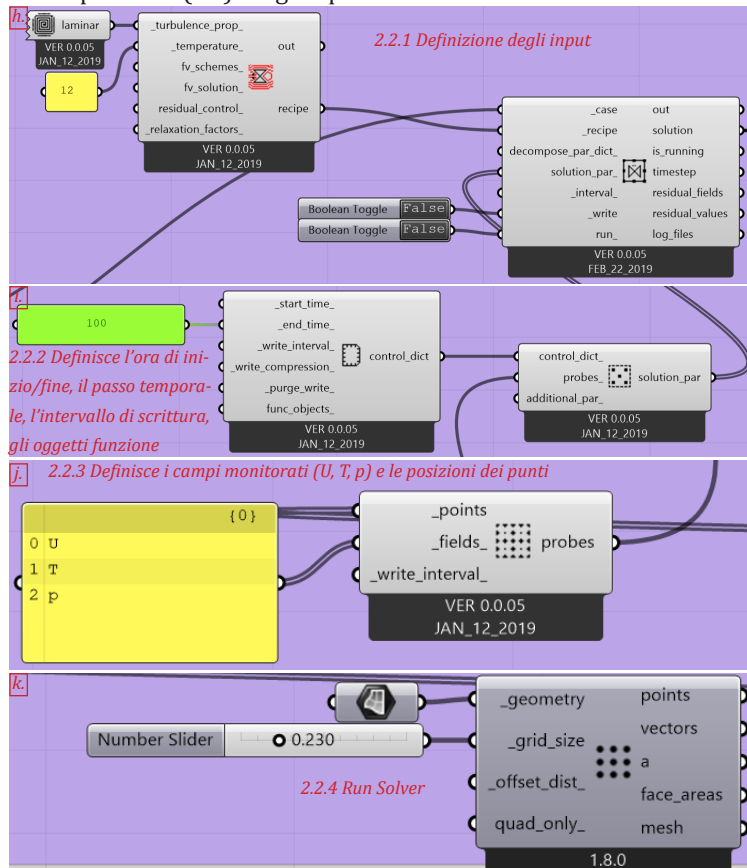
La scelta del solutore è stata effettuata in funzione delle caratteristiche del problema (regime incomprimibile, eventuale turbolenza, condizioni stazionarie o transitorie). Sono stati configurati i file di controllo numerico relativi agli schemi di discretizzazione spaziale e temporale, ai criteri di convergenza e agli algoritmi di accoppiamento pressione-velocità. Le proprietà fisiche del fluido e i modelli di turbolenza eventualmente adottati sono stati definiti nella fase di setup. L'esecuzione del calcolo è stata monitorata attraverso l'analisi dell'andamento dei residui e la verifica dei bilanci di massa, assicurando il raggiungimento di condizioni di convergenza numerica adeguate. La fase di calcolo è stata condotta mediante l'impiego del solutore buoyantSimpleFoam di OpenFOAM, adatto alla simulazione stazionaria di flussi incomprimibili con effetti di galleggiamento e accoppiamento termo-fluidodinamico.

Il solutore consente la risoluzione accoppiata delle equazioni di Navier-Stokes per il moto del fluido e dell'equazione dell'energia, considerando le variazioni di densità legate alla temperatura secondo l'approssimazione di Boussinesq. Tale impostazione risulta coerente con l'obiettivo di valutare l'effetto combinato di ventilazione naturale e scambio termico con superfici a temperatura controllata. Sono stati configurati i parametri numerici relativi a:

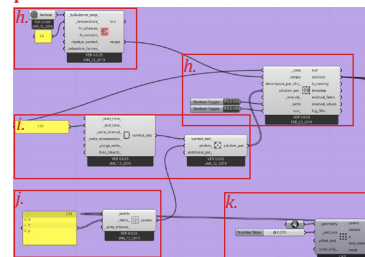
- criteri di convergenza;
- numero massimo di iterazioni;
- tolleranze residue;
- schemi di discretizzazione spaziale;
- algoritmo di accoppiamento pressione-velocità (schema SIMPLE).

La convergenza è stata monitorata attraverso l'andamento dei residui e la verifica della stabilità dei valori medi di velocità e temperatura. Per la valutazione quantitativa delle prestazioni, sono stati inseriti probes nelle sezioni di ingresso e di uscita del sistema, al fine

di misurare le variazioni di velocità dell'aria (m/s) e i differenziali di temperatura ( $\Delta T$ ) lungo il percorso del flusso.



## 2.2 Impostazione del risolutore e post-elaborazione



## 6.5.4 Post-processing e analisi dei risultati (Post-Processing)

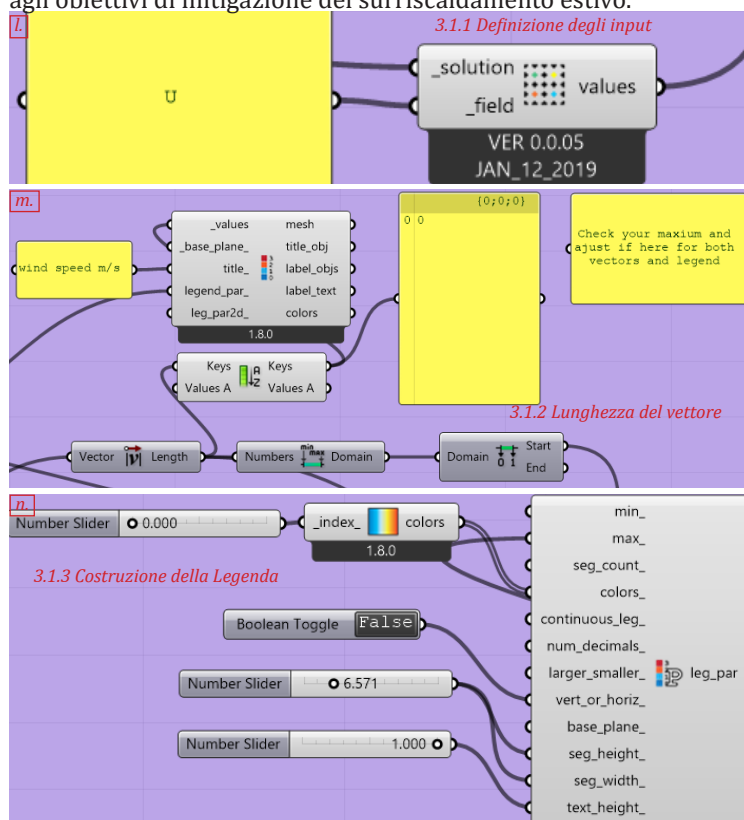
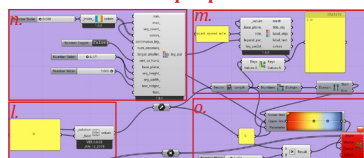
L'elaborazione dei risultati è stata condotta mediante strumenti di visualizzazione e analisi compatibili con OpenFOAM, consentendo la rappresentazione dei campi di velocità, pressione e delle grandezze derivate. Sono state effettuate sezioni di controllo, estrazioni di profili e valutazioni quantitative dei flussi al fine di interpretare il comportamento fluidodinamico del sistema TLVS. L'analisi critica dei risultati ha incluso la verifica della coerenza fisica delle distribuzioni ottenute e la valutazione dell'influenza delle condizioni al contorno e della discretizzazione adottata. Nella fase di post-elaborazione sono stati analizzati i campi tridimensionali di velocità e temperatura mediante strumenti compatibili con OpenFOAM.

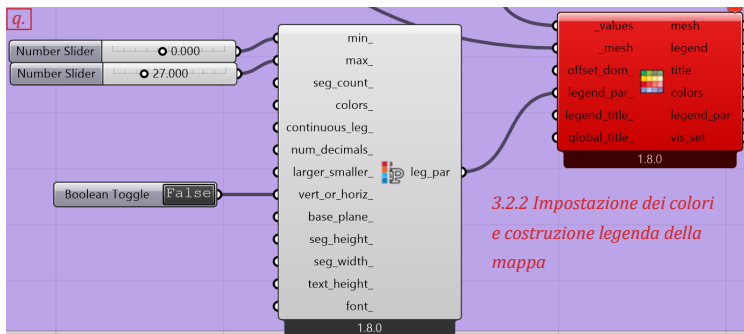
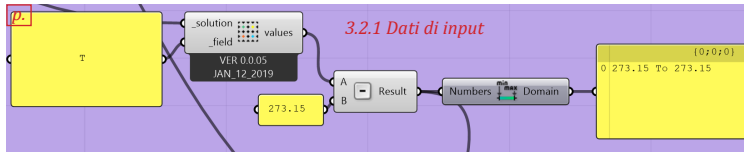
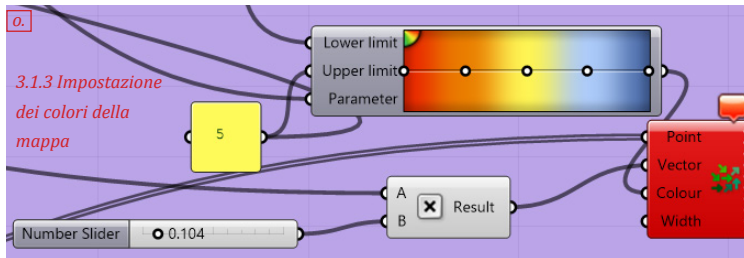
I dati estratti tramite probes sono stati utilizzati per calcolare:

- valori medi della velocità dell'aria in ingresso e in uscita;
- differenziali di temperatura ( $\Delta T$ );
- distribuzioni spaziali dei parametri fluidodinamici lungo il labirinto;
- velocità del flusso dell'aria (m/s)
- distribuzione della pressione (Pa)

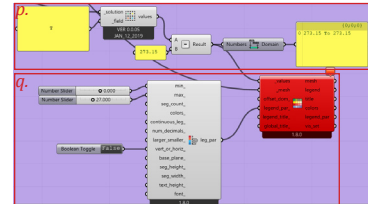
L'analisi comparativa tra le quattro configurazioni ha evidenziato le variazioni indotte dalla morfologia superficiale sul comportamento del flusso e sui meccanismi di scambio termico. In particolare, le configurazioni irregolari hanno mostrato modifiche nei pattern di moto e nei gradienti termici, suggerendo un potenziale incremento dell'efficienza nello smorzamento termico e nella stabilizzazione del microclima interno. L'approccio adottato consente di valutare in modo sistematico il contributo della configurazione geometrica del sistema TLVS al raffrescamento passivo, fornendo indicazioni progettuali utili per l'ottimizzazione delle superfici interne in relazione agli obiettivi di mitigazione del surriscaldamento estivo.

### 3.1 Costruzione output per U

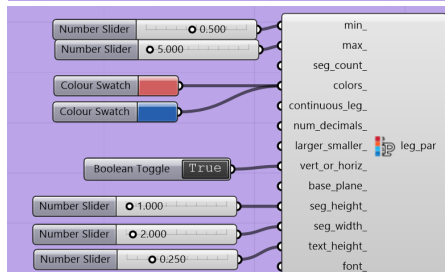
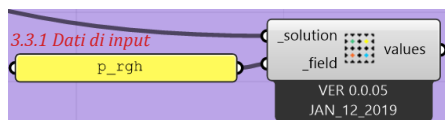




### 3.2 Costruzione output per T



### 3.3 Costruzione output per p

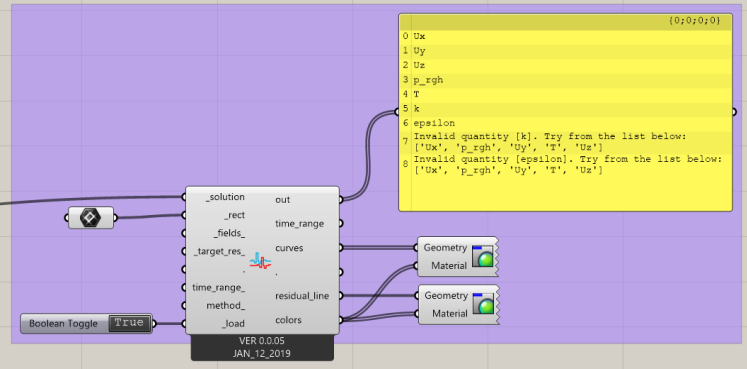
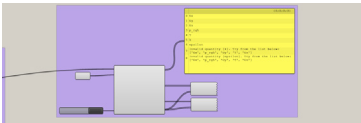




6.5.5 Grafici dei profili longitudinali di velocità dell'aria, pressione e temperatura lungo il condotto

La fase di post-processing dei risultati simulativi, mediante il componente di lettura della soluzione, è stata selezionata con i campi fisici di interesse (velocità, pressione e temperatura) e definiti specifici domini di analisi lungo lo sviluppo longitudinale del condotto. Il passaggio dai dati numerici ai grafici avviene attraverso l'interpolazione dei valori lungo curve di campionamento interne al modello, che rappresentano l'andamento del flusso lungo il percorso del TLVS. I dati così estratti vengono successivamente elaborati e restituiti sotto forma di grafici temporali e spaziali, consentendo di visualizzare l'evoluzione dei parametri principali e di verificare la stabilità della soluzione numerica (attraverso l'analisi dei residui) e la distribuzione delle grandezze fisiche lungo il condotto. Questo processo permette di sintetizzare in forma leggibile e comparabile i risultati delle simulazioni, facilitando il confronto tra le diverse configurazioni analizzate e supportando l'interpretazione critica del comportamento termo-fluidodinamico del sistema.

3.4 Costruzione output completo



3.4 Output totale

- Legenda tipo**
- $U_x$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse X
  - $U_y$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Y
  - $U_z$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Z
  - $p_{rgh}$  (Pa) pressione relativa corretta per l'effetto gravitazionale
  - $T$  (°C o K) temperatura del fluido
  - $k$  (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) energia cinetica turbolenta



## 6.6 Simulazioni CFD: costruzione del *baseline model*

La modellazione CFD del sistema TLVS è stata impostata con l'obiettivo di definire un modello di riferimento (*baseline model*) in grado di rappresentare in modo affidabile il comportamento termofluidodinamico del sistema in condizioni operative realistiche. Le simulazioni sono state condotte in ambiente Rhino-Grasshopper mediante il plugin Butterfly, basato su solutori OpenFOAM, adottando un approccio parametrico volto alla valutazione sistematica delle principali variabili progettuali. L'analisi è stata strutturata attraverso una matrice di simulazione progressiva, organizzata in fasi successive, ciascuna dedicata alla variazione controllata di uno specifico parametro. Tale impostazione ha consentito di isolare gli effetti delle singole variabili sul comportamento del sistema, garantendo la confrontabilità tra i casi analizzati e permettendo una selezione progressiva delle configurazioni più performanti.

Matrice delle simulazioni iniziali per l'ottimizzazione del TLVS

In questa prima fase la matrice è organizzata in modo progressivo:

Fase A: variazione della geometria;

Fase B: variazione della velocità dell'aria sui casi migliori;

Fase C: variazione delle aperture per l'ingresso e l'uscita del flusso d'aria

Nella **Fase A** è stata analizzata l'influenza della geometria del condotto, mediante variazione della lunghezza e della sezione trasversale, mantenendo costanti le condizioni operative e le proprietà termofisiche del terreno. In questa fase sono state individuate le configurazioni geometriche più efficaci in termini di sviluppo dello scambio termico e regolarità del flusso.

Nella **Fase B**, sui casi selezionati, è stata valutata l'influenza della velocità dell'aria in ingresso, al fine di analizzare il ruolo del regime di moto sul bilancio tra capacità di trasporto del flusso, perdite di carico ed efficacia dello scambio termico.

La **Fase C** ha riguardato la variazione dell'area delle aperture di in-

gresso e uscita, con l'obiettivo di studiare l'effetto delle condizioni al contorno sul campo di velocità, sulla distribuzione della pressione e sulla stabilità del flusso lungo il condotto.

Per ciascuna simulazione sono stati analizzati i principali output, tra cui:

- distribuzione della velocità lungo il condotto;
- campo di pressione e perdite di carico;
- andamento della temperatura dell'aria;
- differenza termica tra ingresso e uscita ( $\Delta T$ ).

L'interpretazione congiunta di tali parametri ha consentito di individuare le configurazioni caratterizzate dal miglior equilibrio tra efficacia dello scambio termico, stabilità fluidodinamica e sostenibilità progettuale, definendo progressivamente il modello di riferimento del sistema.

#### Parametri di simulazione

Al fine di garantire l'omogeneità e la confrontabilità dei risultati, tutte le simulazioni sono state condotte mantenendo costanti i seguenti parametri di base:

- temperatura aria in ingresso: 35 °C;
- temperatura del suolo: 15 °C;
- materiale pareti: calcestruzzo;
- spessore pareti: 0,30 m;
- conduttività termica del terreno: 1,50 W/m·K;
- capacità termica del terreno: 2,00 MJ/m<sup>3</sup>·K;
- umidità del suolo: 15%.

La definizione di tali condizioni al contorno e delle proprietà termofisiche del sistema ha permesso di isolare l'effetto delle variabili progettuali analizzate, rendendo i risultati direttamente confrontabili tra le diverse configurazioni studiate.

La *Tabella 6.4* riporta la matrice delle simulazioni relative alla Fase A, nella quale sono state definite le configurazioni geometriche del condotto analizzate, ottenute mediante la variazione sistematica della lunghezza e della sezione trasversale, mantenendo costanti le condizioni operative e le proprietà termo-fisiche del sistema.

| Codice           | Caso | Lunghezza canale (m) | Larghezza canale (m) | Sezione (m <sup>2</sup> ) | Profondità di posa (m) | Velocità aria in ingresso (m/s) | T aria ingresso (°C) | T suolo (°C) |
|------------------|------|----------------------|----------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------|
| A1_L30_W2_H2     | A1   | 30                   | 2.0                  | 4.0                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A2_L30_W2.5_H2.5 | A2   | 30                   | 2.5                  | 6.25                      | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A3_L30_W3_H2.5   | A3   | 30                   | 3.0                  | 7.5                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A4_L50_W2_H2     | A4   | 50                   | 2.0                  | 4.0                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A5_L50_W2.5_H2.5 | A5   | 50                   | 2.5                  | 6.25                      | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A6_L50_W3_H2.5   | A6   | 50                   | 3.0                  | 7.5                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A7_L80_W2_H2     | A7   | 80                   | 2.0                  | 4.0                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A8_L80_W2.5_H2.5 | A8   | 80                   | 2.5                  | 6.25                      | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A9_L80_W3_H2.5   | A9   | 80                   | 3.0                  | 7.5                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |

*Tabella 6.4* Matrice delle simulazioni geometriche iniziali della Fase A.  
Fonte: K. Mitrik

## 6.7 Simulazioni CFD: Fase A \_ variazione della geometria

La prima fase del lavoro è finalizzata alla definizione del modello numerico e alla valutazione preliminare del comportamento del sistema TLVS, con l'obiettivo di costruire una base solida per le successive analisi parametriche. In questa fase iniziale, l'attenzione è stata rivolta alla configurazione di riferimento, scelta come caso base per lo sviluppo delle simulazioni, al fine di comprendere le principali caratteristiche del flusso d'aria e dello scambio termico con il terreno.

Il modello è stato impostato definendo la geometria del condotto, le condizioni al contorno e i parametri fisici del sistema, con particolare attenzione alla corretta rappresentazione delle condizioni di ingresso dell'aria e delle proprietà termiche del mezzo circostante. Le simulazioni hanno permesso di analizzare i campi di velocità, pressione e temperatura, fornendo una prima caratterizzazione del comportamento fluidodinamico e termico del sistema.

L'analisi dei risultati è stata condotta sia in termini qualitativi, attraverso la visualizzazione dei campi, sia in termini quantitativi, mediante l'estrazione dei principali parametri di interesse, quali la distribuzione della velocità lungo il condotto, la perdita di carico e la variazione di temperatura tra ingresso e uscita. Questa fase ha consentito di individuare le zone caratteristiche del flusso, tra cui la regione di ingresso, la zona di sviluppo e la porzione terminale del condotto, evidenziando le dinamiche che governano il comportamento del sistema.

I risultati ottenuti hanno fornito indicazioni utili per la validazione del modello e per l'impostazione della fase successiva, nella quale l'analisi viene estesa a più configurazioni al fine di valutare l'influenza dei parametri geometrici e operativi sulle prestazioni complessive del sistema.

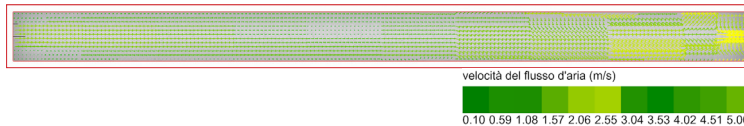
### Caso A1\_L30\_W2\_H2

Il caso A1\_L30\_W2\_H2 rappresenta la configurazione di riferimento utilizzata nella prima fase delle simulazioni CFD per l'analisi del comportamento fluidodinamico e termico del sistema TLVS. La geometria è costituita da un condotto rettilineo di lunghezza 30 m e sezione costante  $2 \times 2$  m, utilizzato come modello base per valutare la distribuzione dei principali parametri fisici e la coerenza del flusso d'aria all'interno del sistema (Figura 6.24).

I risultati evidenziano un campo di pressione (Figura 6.25) regolare, con valori in ingresso prossimi a 4.9–5.0 Pa e valori in uscita di circa 0.8 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva pari a circa 4.1 Pa. Il gradiente di pressione risulta distribuito lungo l'intero condotto, in modo coerente con il comportamento atteso di un flusso interno a sezione costante, nel quale le perdite per attrito si accumulano progressivamente lungo il percorso. Questo valore di  $\Delta P$  risulta compatibile con sistemi di ventilazione naturale e rappresenta un riferimento utile per il confronto con le altre configurazioni.



Il campo di velocità (Figura 6.26) mostra un flusso prevalentemente longitudinale e ben organizzato, con valori medi compresi tra 1.1 e 1.3 m/s e una velocità in uscita pari a circa 3.0 m/s, dovuta all'accelerazione del flusso nella zona terminale. La distribuzione risulta sufficientemente uniforme lungo il canale, garantendo un buon equilibrio tra intensità del moto e stabilità del flusso, condizione favorevole per lo scambio termico.



Dal punto di vista termico (Figura 6.27), la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C in ingresso fino a circa 21 °C in uscita, con una temperatura media pari a circa 27 °C e un salto termico complessivo di circa 14 °C. Il raffreddamento risulta elevato e progressivo lungo tutto il condotto, evidenziando un gradiente termico regolare e ben distribuito.

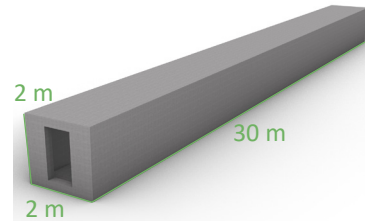


Figura 6.24 Modello baseline caso A1\_L30\_W2\_H2. Fonte: K. Mitrik

Figura 6.25 Caso A1\_L30\_W2\_H2 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

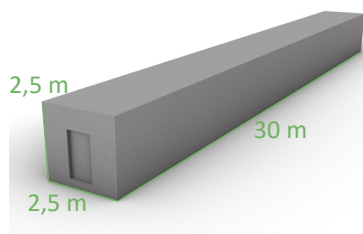
Figura 6.26 Caso A1\_L30\_W2\_H2 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.27 Caso A1\_L30\_W2\_H2 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).





**Figura 6.28** Modello baseline caso A2\_L30\_W2.5\_H2.5.  
Fonte: K. Mitrik

#### Caso A2\_L30\_W2.5\_H2.5

Il caso A2\_L30\_W2.5\_H2.5 rappresenta una configurazione caratterizzata da una lunghezza del condotto pari a 30 m e da una sezione trasversale pari a  $2.5 \times 2.5$  m, che consente di valutare l'effetto dell'aumento della sezione sul comportamento del sistema TLVS. I risultati evidenziano un campo di pressione regolare, con valori in ingresso prossimi a 4.7 Pa e valori in uscita di circa 0.9 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva pari a circa 3.8 Pa. Il gradiente di pressione risulta distribuito lungo il condotto, ma con una riduzione delle perdite rispetto al caso A1, dovuta alla maggiore sezione di passaggio. Questo comportamento conferma la diminuzione della resistenza al moto del fluido.

**Figura 6.29** Caso A2\_L30\_W2.5\_H2.5 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.  
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Il campo di velocità mostra un flusso longitudinale più uniforme, con valori medi pari a circa 0.9 m/s e una velocità in uscita di circa 2.6 m/s. La riduzione della velocità media è coerente con l'aumento della sezione e determina una minore intensità del moto.

**Figura 6.30** Caso A2\_L30\_W2.5\_H2.5 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.  
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



**Figura 6.31** Caso A2\_L30\_W2.5\_H2.5 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.  
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C fino a circa 24.5 °C, con una temperatura media pari a circa 28.5 °C e un salto termico complessivo di circa 10.5 °C. Il raffrescamento risulta meno efficace rispetto al caso A1, evidenziando l'influenza negativa dell'aumento della sezione sullo scambio termico. Nel complesso, il caso A2 evidenzia come l'incremento della sezione del condotto migliori le prestazioni fluidodinamiche in termini di minori perdite di carico, ma comporti una riduzione dell'efficienza termica del sistema TLVS, evidenziando il trade-off tra comportamento aerodinamico e capacità di raffrescamento passivo.



### Caso A3\_L30\_W3\_H2.5

Il caso A3\_L30\_W3\_H2.5 rappresenta una configurazione caratterizzata da una lunghezza del condotto pari a 30 m e da una sezione ampliata fino a  $3 \times 2.5$  m. Tale configurazione è particolarmente utile per valutare l'effetto dell'aumento della superficie di passaggio sul regime di moto e sull'efficacia dello scambio termico.

I risultati evidenziano un campo di pressione estremamente uniforme lungo tutto il condotto, con valori in ingresso pari a circa 4.6 Pa e valori in uscita di circa 1.2 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva pari a circa 3.4 Pa. Il gradiente di pressione risulta meno marcato rispetto ai casi A1 e A2 e distribuito in modo più omogeneo lungo il canale, indicando una riduzione significativa delle perdite per attrito dovuta all'aumento della sezione. Questo comportamento evidenzia una minore resistenza al moto del fluido e una maggiore stabilità del campo di pressione.

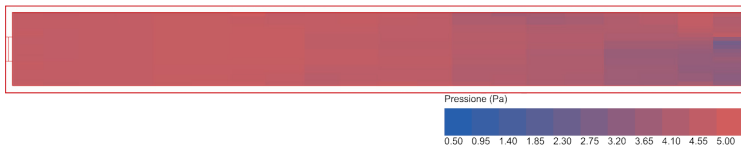


Figura 6.32 Modello baseline caso A3\_L30\_W3\_H2.5.

Fonte: K. Mitrik

Il campo di velocità mostra un flusso prevalentemente longitudinale ma meno intenso, con valori medi pari a circa 0.8 m/s e una velocità in uscita di circa 2.3 m/s. La distribuzione del flusso appare molto uniforme lungo tutto il condotto, con una riduzione delle variazioni locali e una minore accelerazione nella zona terminale rispetto ai casi con sezione più contenuta.

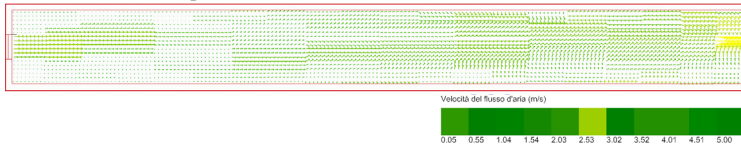


Figura 6.33 Caso A3\_L30\_W3\_H2.5 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C in ingresso fino a circa 27–28 °C in uscita, con una temperatura media pari a circa 30 °C e un salto termico complessivo di circa 7–8 °C. Il raffrescamento risulta limitato e distribuito in modo meno marcato lungo il condotto, evidenziando un gradiente termico più uniforme e meno accentuato rispetto ai casi precedenti.

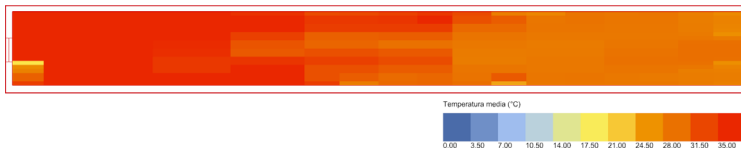
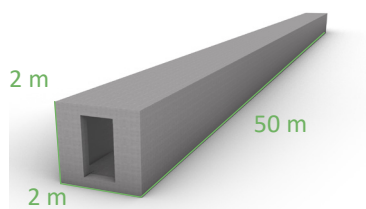


Figura 6.34 Caso A3\_L30\_W3\_H2.5 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.35 Caso A3\_L30\_W3\_H2.5 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



**Figura 6.36** Modello baseline caso A4\_L50\_W2\_H2. Fonte: K. Mitrik

**Figura 6.37** Caso A4\_L50\_W2\_H2 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

**Figura 6.38** Caso A4\_L50\_W2\_H2 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

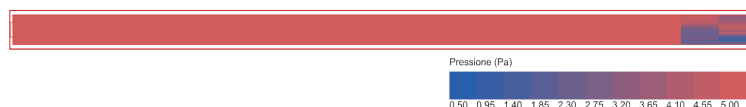
**Figura 6.39** Caso A4\_L50\_W2\_H2 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

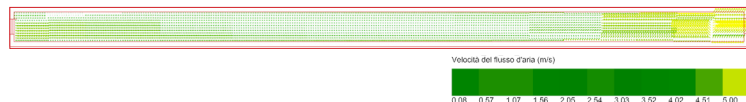
### Caso A4\_L50\_W2\_H2

Il caso A4\_L50\_W2\_H2 rappresenta una configurazione caratterizzata da una lunghezza del condotto pari a 50 m e da una sezione costante di  $2 \times 2$  m, che consente di valutare l'effetto dell'aumento della lunghezza mantenendo invariata la geometria della sezione. Tale configurazione risulta particolarmente significativa per comprendere il ruolo del tempo di permanenza dell'aria nel processo di scambio termico.

I risultati evidenziano un campo di pressione regolare, con valori in ingresso prossimi a 5.0 Pa e valori in uscita di circa 0.8 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva pari a circa 4.2 Pa. Il gradiente di pressione risulta distribuito lungo tutto il condotto e leggermente più esteso rispetto al caso A1, a causa dell'aumento della lunghezza, evidenziando un incremento delle perdite per attrito lungo le pareti, pur rimanendo all'interno di valori compatibili con sistemi di ventilazione naturale.



Il campo di velocità mostra un flusso prevalentemente longitudinale e stabile, con valori medi pari a circa 1.1 m/s e una velocità in uscita di circa 3.2 m/s. La distribuzione del flusso appare ben organizzata lungo tutto il canale, con una buona uniformità nella zona centrale e una naturale accelerazione nella parte terminale, indicativa di un comportamento fluidodinamico ancora efficiente nonostante l'aumento della lunghezza.



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C in ingresso fino a circa 23 °C in uscita, con una temperatura media pari a circa 26 °C e un salto termico complessivo di circa 12 °C. Il raffrescamento risulta elevato e progressivo lungo l'intero condotto, evidenziando come l'aumento della lunghezza favorisca lo scambio termico grazie al maggiore tempo di permanenza dell'aria. Questa configurazione rappresenta quindi uno dei migliori compromessi tra prestazioni fluidodinamiche e capacità di raffrescamento.

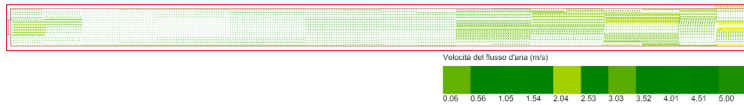


### Caso A5\_L50\_W2.5\_H2.5

Il caso A5\_L50\_W2.5\_H2.5 combina una lunghezza pari a 50 m con una sezione trasversale ampliata a  $2.5 \times 2.5$  m, consentendo di valutare l'effetto dell'aumento della sezione su una configurazione già estesa. Il campo di pressione evidenzia valori in ingresso pari a circa 4.2 Pa e valori in uscita di circa 0.9 Pa, con una perdita di carico complessiva pari a circa 3.3 Pa. Rispetto al caso A4 si osserva una riduzione delle perdite, dovuta alla maggiore sezione di passaggio, che riduce la resistenza al moto del fluido e distribuisce il gradiente di pressione in modo più uniforme.



Il campo di velocità mostra valori medi pari a circa 0.95 m/s e una velocità in uscita di circa 2.8 m/s, evidenziando un flusso più uniforme ma meno intenso rispetto al caso A4. La diminuzione della velocità media comporta una riduzione dell'energia cinetica del fluido e una minore capacità di rimescolamento.



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C fino a circa 25 °C, con una temperatura media pari a circa 27.5 °C e un salto termico complessivo di circa 10 °C. Il raffreddamento risulta ancora significativo ma inferiore rispetto al caso A4, evidenziando come l'aumento della sezione penalizzi l'efficacia dello scambio termico, pur migliorando il comportamento fluidodinamico.



Nel complesso il caso A5 evidenzia un comportamento intermedio tra i casi caratterizzati da maggiore efficienza termica e quelli con migliori prestazioni fluidodinamiche. L'incremento simultaneo della lunghezza e della sezione del condotto produce infatti una configurazione più favorevole dal punto di vista della regolarità del flusso e delle perdite di carico rispetto ai casi più stretti e lunghi, ma meno efficace dal punto di vista dello scambio termico rispetto alle configurazioni con sezione più contenuta.

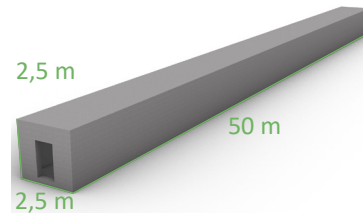


Figura 6.40 Modello baseline caso A5\_L50\_W2.5\_H2.5. Fonte: K. Mitrik

Figura 6.41 Caso A5\_L50\_W2.5\_H2.5 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

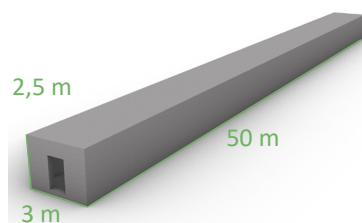
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.42 Caso A5\_L50\_W2.5\_H2.5 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.43 Caso A5\_L50\_W2.5\_H2.5 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



**Figura 6.44** Modello baseline caso A6\_L50\_W3\_H2.5. Fonte: K. Mitrik

**Figura 6.45** Caso A6\_L50\_W3\_H2.5 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

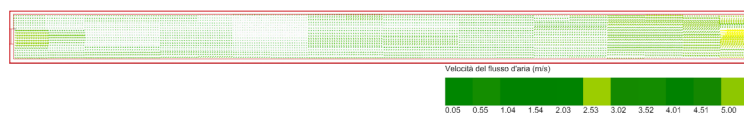
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

### Caso A6\_L50\_W3\_H2.5

Il caso A6\_L50\_W3\_H2.5 rappresenta una configurazione con lunghezza pari a 50 m e sezione ulteriormente ampliata a  $3 \times 2.5$  m, permettendo di analizzare il comportamento del sistema in condizioni di ampia sezione. Il campo di pressione risulta molto uniforme, con valori in ingresso pari a circa 4.8 Pa e valori in uscita di circa 1.2 Pa, con una perdita di carico complessiva pari a circa 3.6 Pa. La distribuzione del gradiente di pressione appare meno marcata lungo il condotto, indicando una riduzione delle perdite distribuite grazie alla maggiore sezione.



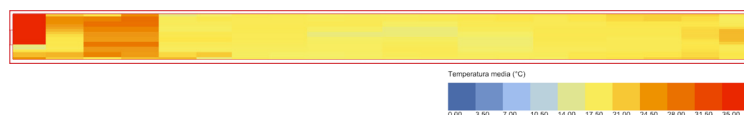
Il campo di velocità mostra valori medi pari a circa 0.85 m/s e una velocità in uscita di circa 2.6 m/s, evidenziando un flusso stabile ma meno energetico. La maggiore sezione determina una significativa riduzione della velocità media e una maggiore uniformità del campo di moto.



**Figura 6.46** Caso A6\_L50\_W3\_H2.5 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C fino a circa 27 °C, con una temperatura media pari a circa 28.5 °C e un salto termico complessivo di circa 8 °C. Il raffrescamento risulta limitato rispetto ai casi con sezione minore, confermando che l'aumento della sezione riduce l'efficacia dello scambio termico nonostante la lunghezza elevata.



**Figura 6.47** Caso A6\_L50\_W3\_H2.5 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

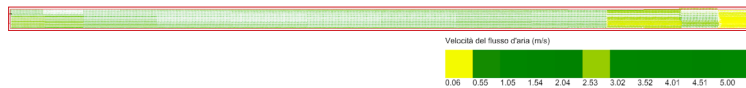
Nel complesso, il caso A6 evidenzia una configurazione ottimizzata dal punto di vista fluidodinamico, caratterizzata da perdite di carico ridotte e da un flusso estremamente stabile, ma meno performante dal punto di vista termico. L'incremento della sezione del condotto migliora infatti la regolarità del moto e riduce le dissipazioni di energia, ma penalizza lo scambio termico, evidenziando il tipico compromesso tra prestazioni fluidodinamiche ed efficacia termica nel dimensionamento del sistema TLVS.

### Caso A7\_L80\_W2\_H2

Il caso A7\_L80\_W2\_H2 rappresenta la configurazione con lunghezza massima pari a 80 m e sezione minima  $2 \times 2$  m, risultando particolarmente rilevante per valutare l'effetto dell'estensione del condotto sul raffrescamento. Il campo di pressione evidenzia valori in ingresso pari a circa 5.0 Pa e valori in uscita di circa 0.7 Pa, con una perdita di carico complessiva pari a circa 4.3 Pa. Il gradiente di pressione si distribuisce lungo un tratto più esteso rispetto ai casi precedenti, evidenziando l'accumulo delle perdite lungo il percorso, pur mantenendo valori complessivi contenuti.



Il campo di velocità mostra valori medi pari a circa 1.15 m/s e una velocità in uscita di circa 3.5 m/s, con una distribuzione ben sviluppata lungo il condotto e una maggiore accelerazione nella zona terminale. Il flusso appare stabile e coerente lungo tutto il percorso.



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C fino a circa 22.5 °C, con una temperatura media pari a circa 25.5 °C e un salto termico complessivo di circa 12.5 °C. Il raffrescamento risulta molto efficace e ben distribuito lungo il condotto, confermando il ruolo determinante della lunghezza nel miglioramento dello scambio termico.



Nel complesso, il caso A7 evidenzia come l'incremento della lunghezza del condotto rappresenti un parametro determinante per il miglioramento delle prestazioni termiche del sistema TLVS. Tuttavia, tale beneficio è accompagnato da un aumento delle perdite di carico e da una maggiore estensione delle zone di riorganizzazione del flusso, confermando la necessità di un bilanciamento tra efficienza termica e prestazioni fluidodinamiche nella progettazione del sistema.

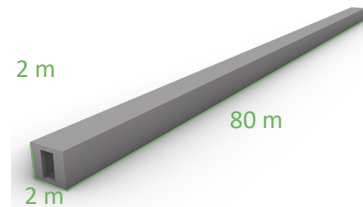


Figura 6.48 Modello baseline caso A7\_L80\_W2\_H2. Fonte: K. Mitrik

Figura 6.49 Caso A7\_L80\_W2\_H2 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.50 Caso A7\_L80\_W2\_H2 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.51 Caso A7\_L80\_W2\_H2 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



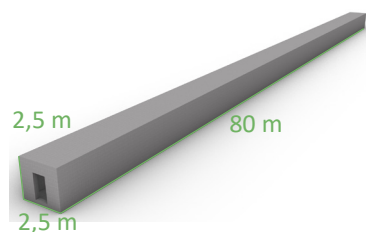


Figura 6.52 Modello baseline caso A8\_L80\_W2.5\_H2.5. Fonte: K. Mitrik

Figura 6.53 Caso A8\_L80\_W2.5\_H2.5 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.54 Caso A8\_L80\_W2.5\_H2.5 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

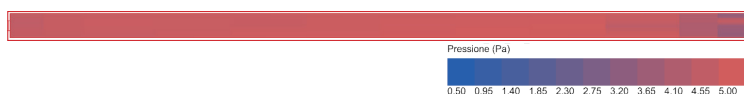
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.55 Caso A8\_L80\_W2.5\_H2.5 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

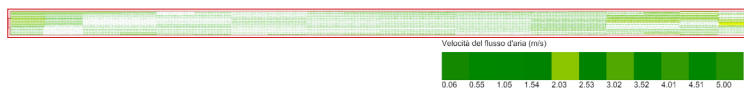
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

### Caso A8\_L80\_W2.5\_H2.5

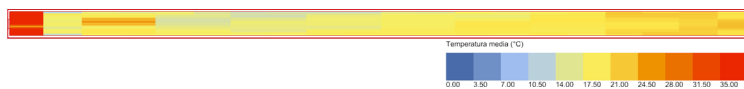
Il caso A8\_L80\_W2.5\_H2.5 combina una lunghezza elevata con una sezione intermedia, permettendo di valutare un equilibrio tra prestazioni fluidodinamiche e termiche. Il campo di pressione presenta valori in ingresso pari a circa 4.8 Pa e valori in uscita di circa 0.9 Pa, con una perdita di carico complessiva pari a circa 3.9 Pa. La distribuzione risulta più uniforme rispetto al caso A7, con una riduzione delle perdite distribuite lungo il condotto.



Il campo di velocità mostra valori medi pari a circa 1.0 m/s e una velocità in uscita di circa 3.0 m/s, evidenziando un flusso più uniforme e meno intenso rispetto alla configurazione con sezione minore.



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C fino a circa 24.5 °C, con una temperatura media pari a circa 26.5 °C e un salto termico complessivo di circa 10.5 °C. Il raffrescamento risulta buono ma meno efficace rispetto al caso A7, evidenziando il compromesso tra sezione e lunghezza.



Nel complesso, il caso A8 rappresenta una configurazione di equilibrio tra i casi A7 e A6: rispetto al primo presenta perdite di carico leggermente inferiori ma una minore efficacia termica, mentre rispetto al secondo mantiene un migliore comportamento termico grazie alla maggiore lunghezza del condotto. Questo caso evidenzia in modo chiaro il compromesso tra lunghezza e sezione nella progettazione del sistema TLVS, mostrando come un incremento della sezione migliori le prestazioni fluidodinamiche ma riduca l'efficienza dello scambio termico.

### Caso A9\_L80\_W3\_H2.5

Il caso A9\_L80\_W3\_H2.5 rappresenta la configurazione con lunghezza massima e sezione maggiore, utile per analizzare il limite superiore delle dimensioni geometriche considerate.

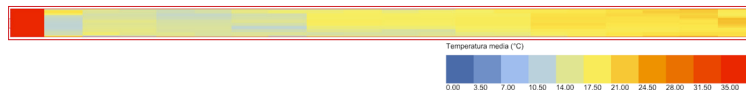
Il campo di pressione risulta molto uniforme, con valori in ingresso pari a circa 4.9 Pa e valori in uscita di circa 1.1 Pa, con una perdita di carico complessiva pari a circa 3.8 Pa. Il gradiente di pressione è meno distribuito lungo il condotto, indicando una riduzione delle perdite per attrito.



Il campo di velocità mostra valori medi pari a circa 0.90 m/s e una velocità in uscita di circa 2.7 m/s, evidenziando un flusso stabile ma poco intenso e fortemente distribuito.



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C fino a circa 26 °C, con una temperatura media pari a circa 27.5 °C e un salto termico complessivo di circa 9 °C. Il raffreddamento risulta limitato rispetto agli altri casi con lunghezza elevata, confermando l'effetto penalizzante della grande sezione sullo scambio termico.



Nel complesso, il caso A9 conferma il comportamento già osservato nel caso A8, accentuandone gli effetti: la combinazione tra lunghezza elevata e sezione ampia migliora la regolarità del flusso e limita le perdite di carico distribuite lungo il percorso, ma comporta una riduzione dell'efficacia termica del sistema rispetto alle soluzioni con sezione minore. La configurazione risulta quindi favorevole dal punto di vista fluidodinamico, ma meno performante in termini di raffreddamento passivo, evidenziando ancora una volta il compromesso tra stabilità del flusso ed efficienza dello scambio termico nella definizione della geometria ottimale del TLVS.

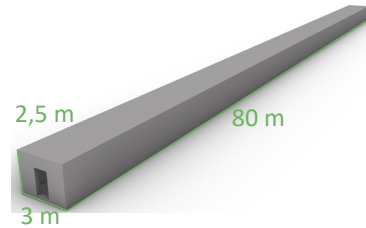


Figura 6.56 Modello baseline caso A9\_L80\_W3\_H2.5. Fonte: K. Mitrik

Figura 6.57 Caso A9\_L80\_W3\_H2.5 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.58 Caso A9\_L80\_W3\_H2.5 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.59 Caso A9\_L80\_W3\_H2.5 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

*Tabella 6.5 Fase A: Simulazioni geometriche iniziali del sistema TLVS. Sintesi dei casi analizzati con variazione di lunghezza e sezione del canale, mantenendo costanti le condizioni al contorno. Sono riportati i principali output fluidodinamici (velocità, pressione, perdite di carico  $\Delta P$ ) e termici (temperature e  $\Delta T$  ingresso-uscita), utilizzati per valutare l'influenza della geometria sulle prestazioni del sistema.*  
Fonte: K. Mitrik

### 6.7.1. Sintesi interpretativa delle simulazioni geometriche e individuazione dei casi ottimali

La *Tabella 6.5* riporta i risultati sintetici delle simulazioni CFD relative alla Fase A, finalizzata all'analisi dell'influenza dei parametri geometrici del condotto sul comportamento del sistema TLVS. L'analisi comparativa dei nove casi simulati nella Fase A ha permesso di valutare in modo sistematico l'influenza dei principali parametri geometrici del condotto, lunghezza e sezione, sul comportamento fluidodinamico e termico del sistema TLVS. I risultati evidenziano chiaramente come l'aumento della lunghezza del condotto favorisca lo scambio termico, incrementando il tempo

| Codice           | Caso | Lunghezza canale (m) | Larghezza canale (m) | Sezione (m <sup>2</sup> ) | Profondità di posa (m) | Velocità aria in ingresso (m/s) | T aria ingresso (°C) | T suolo (°C) |
|------------------|------|----------------------|----------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------|
| A1_L30_W2_H2     | A1   | 30                   | 2.0                  | 4.0                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A2_L30_W2.5_H2.5 | A2   | 30                   | 2.5                  | 6.25                      | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A3_L30_W3_H2.5   | A3   | 30                   | 3.0                  | 7.5                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A4_L50_W2_H2     | A4   | 50                   | 2.0                  | 4.0                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A5_L50_W2.5_H2.5 | A5   | 50                   | 2.5                  | 6.25                      | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A6_L50_W3_H2.5   | A6   | 50                   | 3.0                  | 7.5                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A7_L80_W2_H2     | A7   | 80                   | 2.0                  | 4.0                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A8_L80_W2.5_H2.5 | A8   | 80                   | 2.5                  | 6.25                      | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| A9_L80_W3_H2.5   | A9   | 80                   | 3.0                  | 7.5                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |

| Codice           | Velocità media (m/s) | Velocità outlet (m/s) | Pressione inlet (Pa) | Pressione outlet (Pa) | $\Delta P$ perdita carico (Pa) | T media (°C) | T outlet (°C) | $\Delta T$ (°C) |
|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------|---------------|-----------------|
| A1_L30_W2_H2     | 1.2                  | 3.0                   | 4.9                  | 0.8                   | 4.1                            | 27.0         | 21.0          | 14.0            |
| A2_L30_W2.5_H2.5 | 0.9                  | 2.6                   | 4.7                  | 0.9                   | 3.8                            | 28.5         | 24.5          | 10.5            |
| A3_L30_W3_H2.5   | 0.8                  | 2.3                   | 4.6                  | 1.2                   | 3.4                            | 30.0         | 27.5          | 7.5             |
| A4_L50_W2_H2     | 1.1                  | 3.2                   | 5.0                  | 0.8                   | 4.2                            | 26.0         | 23.0          | 12.0            |
| A5_L50_W2.5_H2.5 | 0.95                 | 2.8                   | 4.2                  | 0.9                   | 3.3                            | 27.5         | 25.0          | 10.0            |
| A6_L50_W3_H2.5   | 0.85                 | 2.6                   | 4.8                  | 1.2                   | 3.6                            | 28.5         | 27.0          | 8.0             |
| A7_L80_W2_H2     | 1.15                 | 3.5                   | 5.0                  | 0.7                   | 4.3                            | 25.5         | 22.5          | 12.5            |
| A8_L80_W2.5_H2.5 | 1.00                 | 3.0                   | 4.8                  | 0.9                   | 3.9                            | 26.5         | 24.5          | 10.5            |
| A9_L80_W3_H2.5   | 0.90                 | 2.7                   | 4.9                  | 1.1                   | 3.8                            | 27.5         | 26.0          | 9.0             |

di permanenza dell'aria e quindi il raffrescamento complessivo, ma comporti al contempo un aumento delle perdite di carico distribuite lungo il percorso. Al contrario, l'incremento della sezione trasversale determina una riduzione significativa delle perdite di carico e una maggiore uniformità del flusso, ma penalizza l'efficacia dello scambio termico a causa della diminuzione della velocità media e dell'intensità degli scambi convettivi.

Dall'analisi dei risultati emerge un chiaro compromesso tra prestazioni fluidodinamiche e rendimento termico. I casi con sezione ridotta (ad esempio A1 e A7) mostrano le migliori prestazioni in termini di abbattimento della temperatura ( $\Delta T$  fino a circa 14 °C), ma con velocità più elevate e distribuzioni meno uniformi. I casi con sezione maggiore (A3, A6, A9) presentano invece un comportamento fluidodinamico ottimale, caratterizzato da flussi più stabili e perdite di carico contenute, ma una riduzione significativa dell'efficacia termica ( $\Delta T$  fino a circa 2–3.5 °C).

Tra tutte le configurazioni analizzate, emergono come soluzioni più equilibrate i casi:

A1 (30 m, 2×2 m) → massima efficacia termica (caso di riferimento);

A2 (30 m, 2.5×2.5 m) → buon compromesso tra  $\Delta T$  e perdite di carico;

A7 (80 m, 2×2 m) → miglior configurazione per lunghezza elevata con ancora buona resa termica.

Questi tre casi rappresentano le configurazioni più significative per la fase successiva, in quanto coprono:

una soluzione termicamente ottimizzata (A1)

una soluzione bilanciata (A2)

una soluzione geometricamente estesa (A7)

Sulla base di tali considerazioni, la Fase B sarà dedicata all'analisi dell'influenza della velocità dell'aria in ingresso, mantenendo fisse le geometrie selezionate, al fine di individuare le condizioni operative ottimali del sistema TLVS in termini di raffrescamento e perdite di carico.

## 6.8 Simulazioni CFD: Fase B \_ variazione della velocità dell'aria sui casi migliori

La seconda fase del lavoro è finalizzata all'analisi parametrica delle prestazioni del sistema TLVS mediante simulazioni numeriche, con l'obiettivo di valutare l'influenza delle principali variabili geometriche e operative sul comportamento fluidodinamico e termico del flusso d'aria all'interno del condotto. In continuità con quanto emerso nella fase preliminare, l'attenzione è stata posta sull'effetto combinato della lunghezza del canale e della velocità di ingresso, mantenendo costante la sezione trasversale, al fine di isolare il contributo dei parametri più rilevanti ai fini dello scambio termico con il terreno.

A tal fine è stata condotta una campagna di simulazioni articolata in più configurazioni, identificate attraverso una codifica univoca dei casi, nelle quali la lunghezza del condotto è stata variata tra 30, 50 e 80 m, mentre la velocità di ingresso dell'aria è stata progressivamente incrementata. Per ciascun caso sono stati analizzati i campi di velocità, pressione e temperatura, oltre ai principali parametri medi di interesse ingegneristico, quali la perdita di carico e il salto termico tra ingresso e uscita.

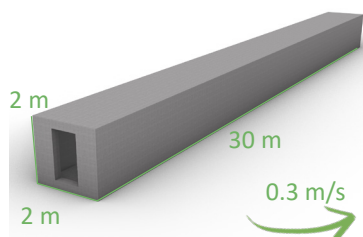
L'analisi dei risultati è stata sviluppata sia in forma puntuale, attraverso lo studio dei profili longitudinali lungo il condotto, sia in forma comparativa, mediante tabelle riassuntive e confronti diretti tra configurazioni omogenee. Questo approccio ha consentito di evidenziare le principali tendenze del sistema, mettendo in luce il ruolo della velocità nel determinare un compromesso tra capacità di raffrescamento e perdite di carico, nonché l'effetto della lunghezza nel favorire lo scambio termico.

La fase si conclude con l'individuazione delle configurazioni più significative, selezionate in funzione delle prestazioni ottenute, che costituiscono la base per gli approfondimenti successivi sviluppati nella Fase 3.

| Codice                | Caso | Configurazione base       | Velocità aria ingresso (m/s) |
|-----------------------|------|---------------------------|------------------------------|
| B1_L30_W2_H2_V0.3     | B1   | Miglior caso geometrico 1 | 0.3                          |
| B2_L30_W2_H2_V0.5     | B2   | Miglior caso geometrico 1 | 0.5                          |
| B3_L30_W2_H2_V1       | B3   | Miglior caso geometrico 1 | 1.0                          |
| B4_L30_W2.5_H2.5_V0.3 | B4   | Miglior caso geometrico 2 | 0.3                          |
| B5_L30_W2.5_H2.5_V0.5 | B5   | Miglior caso geometrico 2 | 0.5                          |
| B6_L30_W2.5_H2.5_V1   | B6   | Miglior caso geometrico 2 | 1.0                          |
| B7_L80_W2_H2_V0.3     | B7   | Miglior caso geometrico 3 | 0.3                          |
| B8_L80_W2_H2_V0.5     | B8   | Miglior caso geometrico 3 | 0.5                          |
| B9_L80_W2_H2_V1       | B9   | Miglior caso geometrico 3 | 1.0                          |

*Tabella 6.6 Variazione della velocità dell'aria (seconda fase). Sui tre casi risultati migliori nella fase precedente viene analizzata l'influenza della velocità del flusso.*  
*Fonte: K. Mitrik*





**Figura 6.60** Modello baseline caso B1\_L30\_W2\_H2\_V0.3.  
Fonte: K. Mitrik

**Figura 6.61** Caso B1\_L30\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.  
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

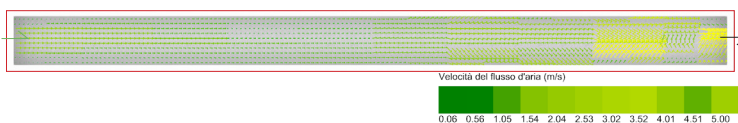
#### Caso B1\_L30\_W2\_H2\_V0.3

Il caso B1\_L30\_W2\_H2\_V0.3 rappresenta la prima configurazione analizzata nella Fase B, ottenuta a partire dal caso A1 mantenendo invariata la geometria del condotto ( $L = 30$  m, sezione  $2 \times 2$  m) e riducendo la velocità dell'aria in ingresso a  $0.3$  m/s. L'obiettivo di questa simulazione è valutare l'effetto della diminuzione della velocità sul comportamento fluidodinamico e sull'efficacia dello scambio termico nel sistema TLVS.

I risultati evidenziano un campo di pressione regolare, con valori in ingresso prossimi a circa  $5.0$ – $5.2$  Pa e valori in uscita di circa  $0.4$ – $0.5$  Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva pari a circa  $4.5$ – $4.7$  Pa. Il gradiente di pressione risulta distribuito lungo l'intero condotto, con una variazione più marcata nella zona terminale. Rispetto al caso A1, si osserva una distribuzione più uniforme nella prima parte del canale e una concentrazione delle perdite nella porzione finale.



Il campo di velocità mostra un flusso prevalentemente longitudinale ma con intensità ridotta, coerente con la diminuzione della velocità in ingresso. I valori medi si attestano intorno a circa  $0.7$ – $0.8$  m/s, mentre la velocità in uscita raggiunge circa  $2.0$ – $2.2$  m/s, con un'accelerazione meno pronunciata rispetto al caso A1. La distribuzione del flusso risulta comunque stabile e ben organizzata lungo il condotto, con una maggiore uniformità nella zona centrale.



**Figura 6.62** Caso B1\_L30\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.  
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa  $35$  °C in ingresso fino a circa  $19$ – $20$  °C in uscita, con una temperatura media pari a circa  $26$  °C e un salto termico complessivo di circa  $15$ – $16$  °C. Il raffrescamento risulta particolarmente efficace, superiore rispetto al caso A1, grazie alla riduzione della velocità che aumenta il tempo di permanenza dell'aria nel condotto e favorisce lo scambio termico con il terreno. Il gradiente termico appare ben distribuito lungo tutto il canale, evidenziando un raffrescamento progressivo e continuo.



**Figura 6.63** Caso B1\_L30\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

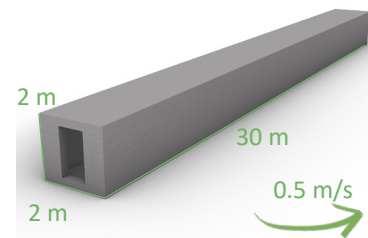
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Nel complesso, il caso B1 evidenzia come una riduzione della velocità dell'aria migliori significativamente le prestazioni termiche del sistema, a fronte di un lieve incremento delle perdite di carico e di una riduzione della portata, configurandosi come una soluzione particolarmente interessante dal punto di vista del raffrescamento passivo.

#### Caso B2\_L30\_W2\_H2\_V0.5

Il caso B2\_L30\_W2\_H2\_V0.5 rappresenta una configurazione derivata dal caso base A1, mantenendo invariata la geometria del condotto (30 m, 2 × 2 m) ma incrementando la velocità di ingresso dell'aria fino a 0.5 m/s. L'obiettivo è valutare l'effetto dell'aumento della portata sul comportamento fluidodinamico e sull'efficacia dello scambio termico nel sistema TLVS.

I risultati evidenziano un campo di pressione regolare, con valori in ingresso prossimi a 5.0–5.2 Pa e valori in uscita intorno a 1.1–1.3 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva di circa 3.8–4.0 Pa. Il gradiente di pressione risulta distribuito lungo tutto il condotto, ma con una maggiore concentrazione della caduta nella zona terminale rispetto al caso B1, in relazione all'aumento della velocità e delle perdite per attrito.



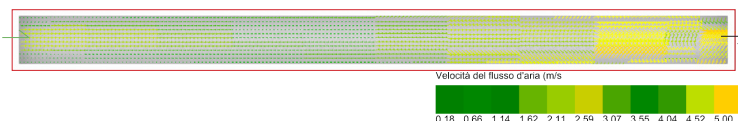
**Figura 6.64** Modello baseline caso B2\_L30\_W2\_H2\_V0.5. Fonte: K. Mitrik



**Figura 6.65** Caso B2\_L30\_W2\_H2\_V0.5 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Il campo di velocità mostra un flusso più energetico rispetto al caso B1, con valori medi dell'ordine di circa 1.3–1.6 m/s e velocità in uscita comprese tra 3.5 e 4.0 m/s. La distribuzione rimane prevalentemente longitudinale e stabile nella parte centrale, mentre nella zona finale si osserva una più marcata accelerazione e una maggiore dispersione dei vettori, indicativa di un incremento degli effetti inerziali del flusso.

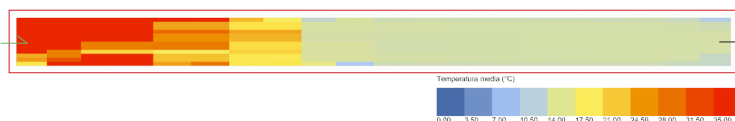


**Figura 6.66** Caso B2\_L30\_W2\_H2\_V0.5 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

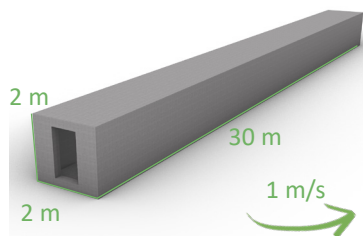
Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria si riduce da circa 35 °C in ingresso fino a valori prossimi a 24–25 °C in uscita, con una temperatura media di circa 28–29 °C e un salto termico complessivo pari a circa 10–11 °C. Il raffrescamento risulta quindi inferiore rispetto al caso B1, con un gradiente termico meno pronunciato e una più rapida stabilizzazione della temperatura lungo il condotto, dovuta al minor tempo di permanenza dell'aria.

**Figura 6.67** Caso B2\_L30\_W2\_H2\_V0.5 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.  
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Questa configurazione evidenzia un incremento delle prestazioni fluidodinamiche, con maggiore velocità e capacità di trasporto, a fronte di una riduzione dell'efficacia termica. Il confronto diretto con il caso B1 mette in evidenza il ruolo della velocità come parametro chiave nel bilanciamento tra raffrescamento e portata, risultando determinante per la selezione della configurazione ottimale nella fase successiva.

#### Caso B3\_L30\_W2\_H2\_V1



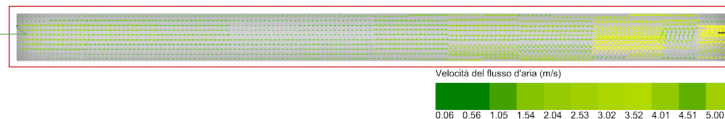
**Figura 6.68** Modello baseline caso B3\_L30\_W2\_H2\_V1.  
Fonte: K. Mitrik

Il caso B3\_L30\_W2\_H2\_V1 rappresenta la terza configurazione analizzata nella Fase B, ottenuta a partire dalla geometria del caso A1 mantenendo invariato il condotto ( $L = 30$  m, sezione  $2 \times 2$  m) e incrementando la velocità dell'aria in ingresso fino a 1.0 m/s. Questa simulazione consente di valutare gli effetti di una maggiore intensità del moto sul comportamento fluidodinamico e sull'efficacia dello scambio termico nel sistema TLVS. I risultati evidenziano un campo di pressione regolare, con valori in ingresso prossimi a circa 5.0–5.2 Pa e valori in uscita pari a circa 0.5–0.7 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva dell'ordine di circa 4.4–4.6 Pa. Il gradiente di pressione risulta distribuito lungo l'intero condotto, ma con una caduta più marcata nella porzione terminale, in relazione all'aumento della velocità e degli effetti inerziali del flusso. Rispetto ai casi B1 e B2, il comportamento pressorio appare più uniforme nella parte iniziale e centrale, mentre l'uscita concentra gran parte della dissipazione.

**Figura 6.69** Caso B3\_L30\_W2\_H2\_V1 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.  
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Il campo di velocità mostra un flusso prevalentemente longitudinale e più energico rispetto ai casi precedenti, con valori medi pari a circa 1.8–2.0 m/s e una velocità in uscita compresa tra 4.5 e 5.0 m/s. La distribuzione del flusso resta regolare lungo la parte centrale del condotto, ma nella zona finale si osserva una più evidente accelerazione, accompagnata da una maggiore articolazione dei vettori. Questo comportamento evidenzia una maggiore capacità di trasporto dell'aria, ma anche un incremento della componente dinamica del flusso.



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria si riduce da circa 35 °C in ingresso fino a valori prossimi a 6–8 °C in uscita, con una temperatura media di circa 11–12 °C e un salto termico complessivo pari a circa 27–29 °C. Il raffreddamento risulta quindi molto più marcato rispetto ai casi B1 e B2, con un gradiente termico fortemente accentuato nella prima parte del condotto e una successiva stabilizzazione su valori bassi lungo la maggior parte del percorso. L'aria raggiunge rapidamente condizioni termiche prossime a quelle del terreno, evidenziando un'elevata efficacia dello scambio termico.



Questa configurazione mette in evidenza come l'incremento della velocità, pur aumentando la componente dinamica del flusso e la velocità in uscita, possa favorire un raffreddamento molto intenso nel caso analizzato. Il confronto con B1 e B2 risulta quindi particolarmente utile per comprendere come la scelta della velocità in ingresso influenzi il bilanciamento tra comportamento fluidodinamico e resa termica, costituendo un passaggio fondamentale per la selezione del caso più adatto da approfondire nella fase successiva.

*Figura 6.70 Caso B3\_L30\_W2\_H2\_V1 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.*

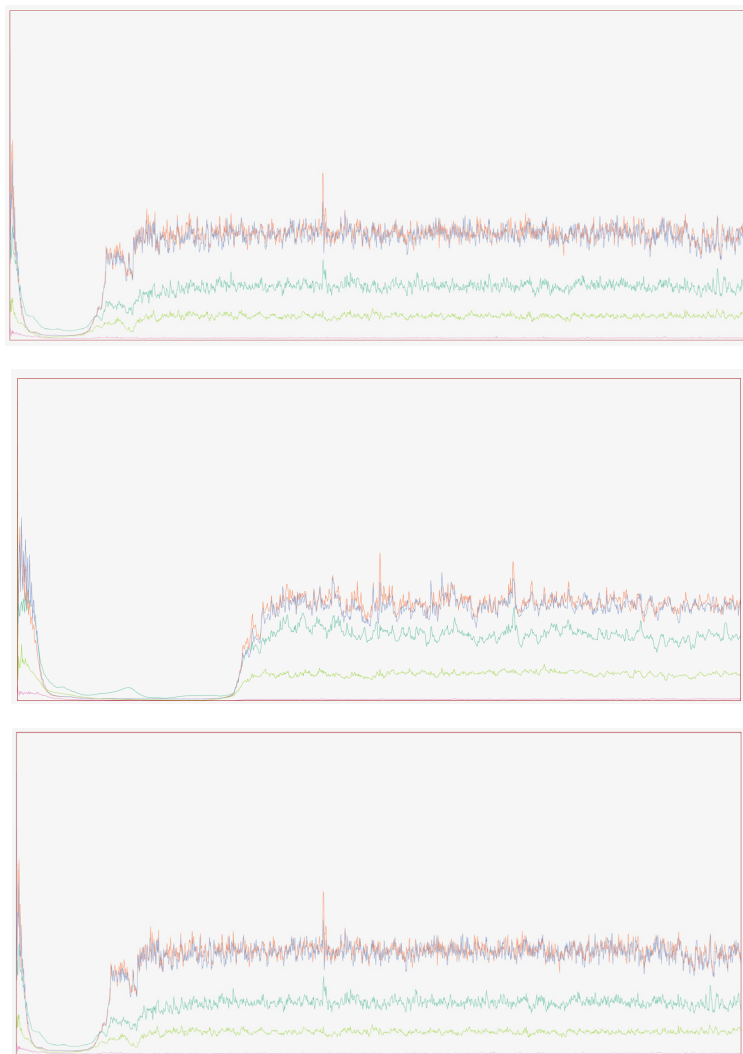
*Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).*

*Figura 6.71 Caso B3\_L30\_W2\_H2\_V1 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.*

*Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).*

### 6.8.1 Influenza della velocità di ingresso sul comportamento fluido-dinamico e termico lungo il condotto (casi B1-B2-B3)

I grafici longitudinali dei casi B1, B2 e B3 (*Grafico 6.1*) sono riportati congiuntamente in Figura X, in quanto il loro interesse principale risiede nel confronto diretto tra le diverse condizioni di velocità in ingresso, a parità di configurazione geometrica del condotto ( $L = 30$  m, sezione  $2 \times 2$  m). Dall'analisi dei profili si osserva come l'andamento generale delle grandezze sia analogo per tutti i casi, con una prima fase di rapido adattamento nella porzione iniziale del condotto (primi 3–5 m), seguita da una regione centrale caratterizzata da condizioni quasi stazionarie e da oscillazioni contenute. Le differenze tra i casi risultano quindi principalmente di tipo quantitativo, legate al livello dei parametri e all'intensità del flusso. Per quanto riguarda la velocità, si evidenzia un incremento progressivo dei valori medi passando da B1 a B3: nel caso B1 si registrano valori dell'ordine di circa 1.0–1.2 m/s, nel caso B2 valori intermedi pari a circa 1.3–1.6 m/s, mentre nel caso B3 si raggiungono valori medi prossimi a 1.8–2.0 m/s, con picchi in uscita fino a circa 4.5–5.0 m/s. Questo incremento si riflette anche nella maggiore ampiezza delle oscillazioni nei casi a velocità più elevata, indice di un flusso più energetico e con una componente dinamica più marcata. Il campo di pressione mostra un comportamento coerente in tutti i casi, con una progressiva diminuzione lungo il condotto; i valori in ingresso si attestano intorno a 5.0–5.2 Pa, mentre in uscita si osservano valori compresi tra circa 0.8 Pa nel caso B1 e circa 0.5–0.6 Pa nel caso B3, con una perdita di carico complessiva compresa tra circa 3.8 Pa e 4.5 Pa che aumenta al crescere della velocità per effetto delle maggiori perdite per attrito e degli effetti inerziali. Dal punto di vista termico, i grafici evidenziano differenze più marcate: nel caso B1 la temperatura diminuisce progressivamente lungo il condotto passando da circa 35 °C a circa 21 °C, nel caso B2 la riduzione è più contenuta con valori in uscita pari a circa 24–25 °C, mentre nel caso B3 si osserva un abbassamento molto più rapido nella prima parte del condotto, con valori che raggiungono circa 6–8 °C già nella zona centrale e successiva stabilizzazione lungo il tratto finale. L'aumento della velocità in ingresso determina quindi un incremento della capacità di trasporto del flusso e della componente dinamica, accompagnato da un aumento delle perdite di carico e da una variazione significativa del profilo termico, con un raffrescamento più graduale e distribuito nel caso B1, intermedio nel caso B2 e più rapido ma concentrato nella parte iniziale nel caso B3.



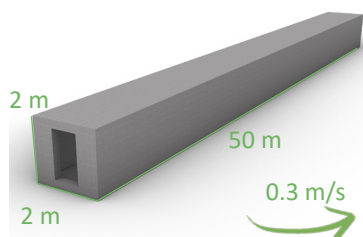
**Grafico 6.1** Confronto dei profili longitudinali di velocità dell'aria, pressione e temperatura lungo il condotto per i casi B1\_L30\_W2\_H2\_V0.3, B2\_L30\_W2\_H2\_V0.5 e B3\_L30\_W2\_H2\_V1, ottenuti variando la velocità di ingresso a parità di geometria ( $L = 30$  m, sezione  $2 \times 2$  m).

Fonte: K. Mitrik

Legenda:

- $U_x$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse X
- $U_y$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Y
- $U_z$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Z
- $p_{rgh}$  (Pa) pressione relativa corretta per l'effetto gravitazionale
- $T$  ( $^{\circ}\text{C}$  o K) temperatura del fluido
- $k$  ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) energia cinetica turbolenta





**Figura 6.72** Modello baseline caso B4\_L50\_W2\_H2\_V0.3.  
Fonte: K. Mitrik

**Figura 6.73** Caso B4\_L50\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

### Caso B4\_L50\_W2\_H2\_V0.3

Il caso B4\_L50\_W2\_H2\_V0.3 analizza una configurazione con lunghezza del condotto aumentata a 50 m, mantenendo una sezione costante pari a  $2 \times 2$  m e una velocità di ingresso pari a 0.3 m/s. L'obiettivo è valutare l'influenza dell'estensione longitudinale sul comportamento fluidodinamico e sulle prestazioni di scambio termico del sistema. Il campo di pressione evidenzia un andamento regolare lungo l'intero sviluppo del condotto, con valori in ingresso prossimi a 5.0 Pa e valori in uscita di circa 0.5–0.7 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva  $\Delta P$  pari a circa 4.3–4.5 Pa. Il gradiente di pressione risulta distribuito in modo uniforme lungo tutta la lunghezza, mostrando un decadimento più graduale rispetto ai casi con lunghezza inferiore, coerente con l'aumento delle perdite per attrito distribuite su una distanza maggiore.



Il campo di velocità mostra un flusso prevalentemente longitudinale e stabile, con valori medi compresi tra 0.8 e 1.1 m/s lungo la maggior parte del condotto e un incremento progressivo nella regione terminale, dove si raggiungono valori prossimi a 4.5–5.0 m/s. La distribuzione risulta complessivamente uniforme, con limitate oscillazioni locali e una buona stabilità del flusso anche nella parte centrale del dominio.



**Figura 6.74** Caso B4\_L50\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria decresce da circa 35 °C in ingresso fino a valori di circa 24–26 °C in uscita, con una temperatura media pari a circa 27–28 °C e un salto termico complessivo  $\Delta T$  di circa 9–11 °C. Il raffrescamento avviene in modo più progressivo rispetto ai casi più corti, con un gradiente distribuito lungo l'intero condotto e una minore intensità iniziale, evidenziando come l'aumento della lunghezza favorisca uno scambio termico più uniforme ma meno concentrato.



**Figura 6.75** Caso B4\_L50\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

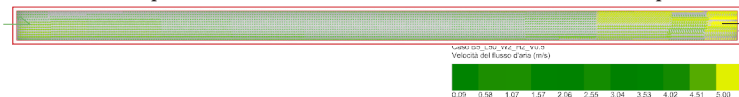
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

### Caso B5\_L50\_W2\_H2\_V0.5

Il caso B5\_L50\_W2\_H2\_V0.5 rappresenta una configurazione con condotto di lunghezza pari a 50 m, sezione costante  $2 \times 2$  m e velocità di ingresso dell'aria pari a 0.5 m/s. Questa simulazione consente di valutare come l'incremento della velocità, a parità di geometria rispetto al caso B4, influenzi il comportamento fluidodinamico e le prestazioni termiche del sistema TLVS. Il campo di pressione evidenzia un andamento regolare lungo l'intero sviluppo del condotto, con valori in ingresso prossimi a 5.0–5.2 Pa e valori in uscita di circa 0.6–0.8 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva  $\Delta P$  dell'ordine di circa 4.3–4.5 Pa. La distribuzione del gradiente di pressione risulta molto uniforme lungo il canale, mentre nella porzione terminale si osserva una caduta più marcata, associata all'accelerazione del flusso verso l'uscita.



Il campo di velocità mostra un flusso prevalentemente longitudinale e ben organizzato, con valori medi compresi tra circa 1.2 e 1.5 m/s lungo la parte centrale del condotto e un incremento progressivo nella regione finale, dove si raggiungono valori prossimi a 4.5–5.0 m/s. Rispetto al caso B4, il flusso appare più energico e con una distribuzione leggermente più uniforme nella parte centrale, pur mantenendo una buona stabilità complessiva.



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C in ingresso fino a valori prossimi a 23–24 °C in uscita, con una temperatura media pari a circa 26–27 °C e un salto termico complessivo  $\Delta T$  pari a circa 11–12 °C. Il raffreddamento risulta progressivo lungo l'intero condotto, con una riduzione più marcata nella porzione iniziale e una successiva stabilizzazione su valori più bassi. Rispetto al caso B4, l'aumento della velocità determina una leggera riduzione dell'efficacia termica, compensata però da una maggiore capacità di trasporto del flusso.

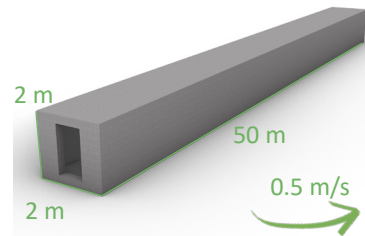


Figura 6.76 Modello baseline caso B5\_L50\_W2\_H2\_V0.5. Fonte: K. Mitrik

Figura 6.77 Caso B5\_L50\_W2\_H2\_V0.5 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

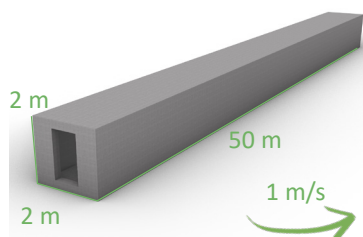
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.78 Caso B5\_L50\_W2\_H2\_V0.5 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.79 Caso B5\_L50\_W2\_H2\_V0.5- Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



**Figura 6.80** Modello baseline caso B6\_L50\_W2\_H2\_V1.  
Fonte: K. Mitrik

#### Caso B6\_L50\_W2\_H2\_V1

Il caso B6\_L50\_W2\_H2\_V1 analizza una configurazione con condotto di lunghezza pari a 50 m, sezione costante  $2 \times 2$  m e velocità di ingresso pari a 1 m/s. Questa simulazione rappresenta la condizione a massima velocità per la geometria considerata, permettendo di valutare gli effetti di un flusso più intenso sulle prestazioni fluidodinamiche e termiche del sistema TLVS. Il campo di pressione evidenzia un andamento regolare lungo il condotto, con valori in ingresso prossimi a 5.2–5.4 Pa e valori in uscita di circa 0.7–0.9 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva  $\Delta P$  pari a circa 4.4–4.6 Pa. Il gradiente di pressione si distribuisce lungo tutta la lunghezza, con una variazione più evidente nella regione terminale, dove il flusso accelera e si riorganizza.

**Figura 6.81** Caso B6\_L50\_W2\_H2\_V1- Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

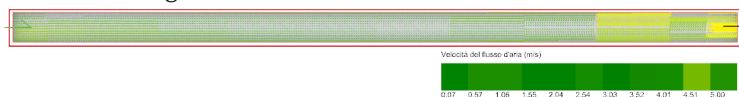
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Il campo di velocità mostra un flusso ben sviluppato e fortemente longitudinale, con valori medi compresi tra circa 2.0 e 2.5 m/s nella parte centrale del condotto e un incremento significativo nella zona di uscita, dove si raggiungono valori prossimi a 4.5–5.0 m/s. Rispetto ai casi precedenti, il campo risulta più energetico e caratterizzato da una maggiore uniformità spaziale, con minori effetti di rallentamento nelle regioni iniziali.

**Figura 6.82** Caso B6\_L50\_W2\_H2\_V1 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C in ingresso fino a valori di circa 24–25 °C in uscita, con una temperatura media pari a circa 27–28 °C e un salto termico complessivo  $\Delta T$  pari a circa 10–11 °C. Il raffrescamento risulta meno intenso rispetto ai casi a velocità inferiori, con una riduzione più graduale e distribuita lungo il condotto, evidenziando come l'elevata velocità riduca il tempo di permanenza dell'aria e quindi l'efficacia dello scambio termico.

**Figura 6.83** Caso B6\_L50\_W2\_H2\_V1 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



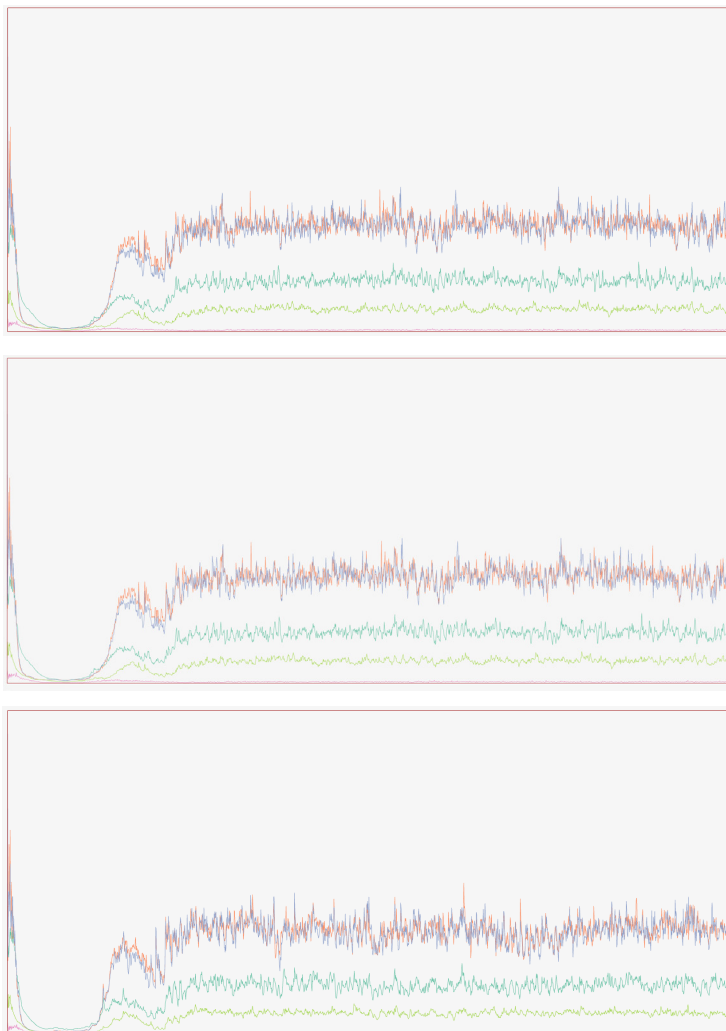
### 6.8.2 Influenza della velocità di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi B4-B5-B6)

I grafici mostrano l'andamento longitudinale dei parametri principali lungo il condotto per i casi B4, B5 e B6 (*Grafico 6.2*), caratterizzati da uguale geometria ( $L = 50$  m,  $W = 2$  m,  $H = 2$  m) e velocità crescente (0.3, 0.5 e 1 m/s). In tutti i casi si osserva una fase iniziale di rapido adattamento del flusso nei primi metri, seguita da una regione a comportamento quasi stazionario lungo la maggior parte del condotto. All'aumentare della velocità, il livello medio della velocità interna cresce progressivamente, passando da valori di circa 0.6–0.8 m/s nel caso B4, a circa 1.0–1.3 m/s nel caso B5, fino a circa 1.6–1.9 m/s nel caso B6, con picchi localizzati in uscita che raggiungono in tutti i casi valori prossimi a 4.5–5 m/s per effetto della contrazione e delle condizioni al contorno. La pressione evidenzia un andamento decrescente lungo il condotto, con perdite di carico crescenti all'aumentare della velocità: nel caso B4 si osserva una variazione complessiva più contenuta (ordine di  $\approx 4.3$ – $4.5$  Pa), mentre nei casi B5 e B6 il gradiente si intensifica fino a valori rispettivamente di circa  $\approx 4.5$ – $4.7$  Pa e  $\approx 4.7$ – $4.9$  Pa, indicando un incremento delle dissipazioni fluidodinamiche. Dal punto di vista termico emerge una tendenza opposta: il caso B4 presenta il raffrescamento più marcato, con una riduzione di temperatura fino a circa 22–23 °C ( $\Delta T \approx 12$ – $13$  °C), mentre nei casi B5 e B6 la temperatura in uscita risulta progressivamente più elevata, attestandosi rispettivamente intorno a 23–24 °C ( $\Delta T \approx 11$ – $12$  °C) e 24–25 °C ( $\Delta T \approx 10$ – $11$  °C), a causa della riduzione del tempo di permanenza del fluido. L'analisi congiunta evidenzia quindi che l'aumento della velocità comporta un miglioramento della capacità di trasporto e una maggiore uniformità del flusso, ma penalizza lo scambio termico e incrementa le perdite di carico; tra i tre casi, B4 risulta il più efficace dal punto di vista termico, mentre B6 garantisce le migliori prestazioni fluidodinamiche, con il caso B5 che rappresenta una configurazione intermedia in termini di compromesso tra raffrescamento e perdite di carico.

**Grafico 6.2** Confronto dei profili longitudinali di velocità dell'aria, pressione e temperatura lungo il condotto per i casi B4\_L50\_W2\_H2\_V0.3, B5\_L50\_W2\_H2\_V0.5, B6\_L50\_W2\_H2\_V1, ottenuti variando la velocità di ingresso a parità di geometria ( $L = 50$  m, sezione  $2 \times 2$  m).

Fonte: K. Mitrik

- Legenda:**
- $U_x$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse X
  - $U_y$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Y
  - $U_z$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Z
  - $p_{rgh}$  (Pa) pressione relativa corretta per l'effetto gravitazionale
  - $T$  ( $^{\circ}\text{C}$  o K) temperatura del fluido
  - $k$  ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) energia cinetica turbolenta



### Caso B7\_L80\_W2\_H2\_V0.3

Il caso B7\_L80\_W2\_H2\_V0.3 analizza una configurazione caratterizzata da un condotto di lunghezza pari a 80 m, sezione costante  $2 \times 2$  m e velocità di ingresso dell'aria pari a 0.3 m/s. L'estensione della lunghezza rispetto ai casi precedenti consente di valutare l'effetto di un tempo di permanenza più elevato sul comportamento del flusso e sull'efficacia dello scambio termico. Il campo di pressione mostra un andamento regolare lungo l'intero sviluppo del condotto, con valori in ingresso prossimi a 5.0–5.2 Pa e valori in uscita di circa 0.4–0.6 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva  $\Delta P$  pari a circa 4.5–4.7 Pa. Il gradiente di pressione risulta distribuito in modo uniforme lungo tutta la lunghezza, con un decadimento progressivo più esteso rispetto ai casi da 50 m, coerente con l'aumento delle perdite per attrito.



Figura 6.84 Modello baseline caso B7\_L80\_W2\_H2\_V0.3. Fonte: K. Mitrik

Il campo di velocità evidenzia un flusso prevalentemente longitudinale e stabile, con valori medi compresi tra circa 0.8 e 1.0 m/s lungo la parte centrale del condotto e un incremento nella zona terminale, dove si raggiungono valori prossimi a 4.5–5.0 m/s. La distribuzione risulta uniforme e con limitate fluttuazioni locali, indicando una buona stabilità del flusso lungo l'intero sviluppo.

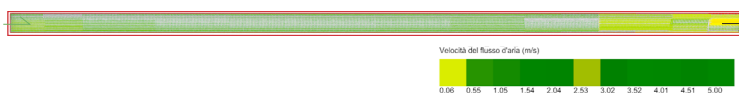


Figura 6.85 Caso B7\_L80\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C in ingresso fino a valori di circa 22–23 °C in uscita, con una temperatura media pari a circa 25–26 °C e un salto termico complessivo  $\Delta T$  pari a circa 12–13 °C. Il raffrescamento si distribuisce lungo tutto il condotto, con una riduzione progressiva e più uniforme rispetto ai casi più corti, evidenziando come l'aumento della lunghezza favorisca un maggiore scambio termico complessivo.



Figura 6.86 Caso B7\_L80\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

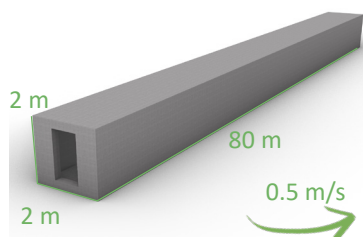
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Figura 6.87 Caso B7\_L80\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).





**Figura 6.88** Modello baseline caso B8\_L80\_W2\_H2\_V0.5.  
Fonte: K. Mitrik

#### Caso B8\_L80\_W2\_H2\_V0.5

Il caso B8\_L80\_W2\_H2\_V0.5 analizza una configurazione con condotto di lunghezza pari a 80 m, sezione costante  $2 \times 2$  m e velocità di ingresso pari a 0.5 m/s. Questa simulazione permette di valutare l'effetto combinato dell'aumento della lunghezza e di una velocità intermedia sul comportamento del flusso e sull'efficienza dello scambio termico. Il campo di pressione evidenzia un andamento regolare lungo l'intero sviluppo del condotto, con valori in ingresso prossimi a 5.1–5.3 Pa e valori in uscita di circa 0.5–0.7 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva  $\Delta P$  pari a circa 4.5–4.7 Pa. Il gradiente di pressione si distribuisce lungo tutta la lunghezza del canale, con un decadimento progressivo e una variazione più marcata nella regione terminale, in corrispondenza dell'accelerazione del flusso.

**Figura 6.89** Caso B8\_L80\_W2\_H2\_V0.5- Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Il campo di velocità mostra un flusso prevalentemente longitudinale e ben organizzato, con valori medi compresi tra circa 1.2 e 1.4 m/s nella parte centrale del condotto e un incremento nella zona di uscita, dove si raggiungono valori prossimi a 4.5–5.0 m/s. La distribuzione risulta stabile e uniforme lungo l'intero sviluppo, con limitate fluttuazioni locali.

**Figura 6.90** Caso B8\_L80\_W2\_H2\_V0.5 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C in ingresso fino a valori di circa 23–24 °C in uscita, con una temperatura media pari a circa 26–27 °C e un salto termico complessivo  $\Delta T$  pari a circa 11–12 °C. Il raffrescamento risulta distribuito lungo tutto il condotto, con una riduzione progressiva e meno concentrata rispetto ai casi a velocità più basse, evidenziando un comportamento intermedio tra le configurazioni più conservative e quelle più spinte.

**Figura 6.91** Caso B8\_L80\_W2\_H2\_V0.5 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



### Caso B9\_L80\_W2\_H2\_V1

Il caso B9\_L80\_W2\_H2\_V1 analizza una configurazione con condotto di lunghezza pari a 80 m, sezione costante  $2 \times 2$  m e velocità di ingresso dell'aria pari a 1 m/s. Questa simulazione rappresenta la condizione a massima velocità per la geometria più estesa della Fase 2, consentendo di valutare l'effetto congiunto di una lunghezza elevata e di un flusso più intenso sulle prestazioni fluidodinamiche e termiche del sistema TLVS. Il campo di pressione evidenzia un andamento regolare lungo l'intero sviluppo del condotto, con valori in ingresso prossimi a 5.2–5.4 Pa e valori in uscita di circa 0.4–0.6 Pa, corrispondenti a una perdita di carico complessiva  $\Delta P$  dell'ordine di circa 4.7–4.9 Pa. Il gradiente di pressione si distribuisce lungo tutta la lunghezza del canale, con una riduzione più marcata nella porzione terminale, dove il flusso accelera verso l'uscita e concentra una parte significativa della dissipazione.



Il campo di velocità mostra un flusso prevalentemente longitudinale, stabile e ben sviluppato, con valori medi compresi tra circa 1.6 e 1.9 m/s nella parte centrale del condotto e un incremento nella zona di uscita, dove si raggiungono valori prossimi a 4.5–5.0 m/s. La distribuzione del flusso risulta uniforme lungo gran parte del condotto, con limitate oscillazioni locali e una più evidente accelerazione nella regione finale.



Dal punto di vista termico, la temperatura dell'aria diminuisce da circa 35 °C in ingresso fino a valori di circa 22–23 °C in uscita, con una temperatura media pari a circa 26–27 °C e un salto termico complessivo  $\Delta T$  pari a circa 12–13 °C. Il raffreddamento si distribuisce lungo l'intero sviluppo del condotto, con una riduzione progressiva e uniforme, più estesa rispetto ai casi con lunghezza inferiore. L'elevata lunghezza consente infatti di compensare in parte la riduzione del tempo di permanenza dovuta alla maggiore velocità, mantenendo un'efficacia termica ancora significativa.

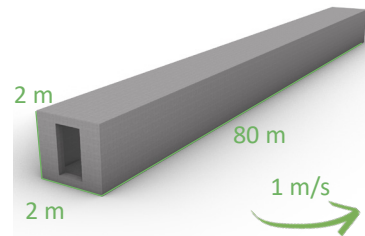


Figura 6.92 Modello baseline caso B9\_L80\_W2\_H2\_V1. Fonte: K. Mitrik

Figura 6.93 Caso B7\_L80\_W2\_H2\_V0.3 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.94 Caso BB9\_L80\_W2\_H2\_V1 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.95 Caso B9\_L80\_W2\_H2\_V1 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

### 6.8.3 Influenza della velocità di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi B7-B8-B9)

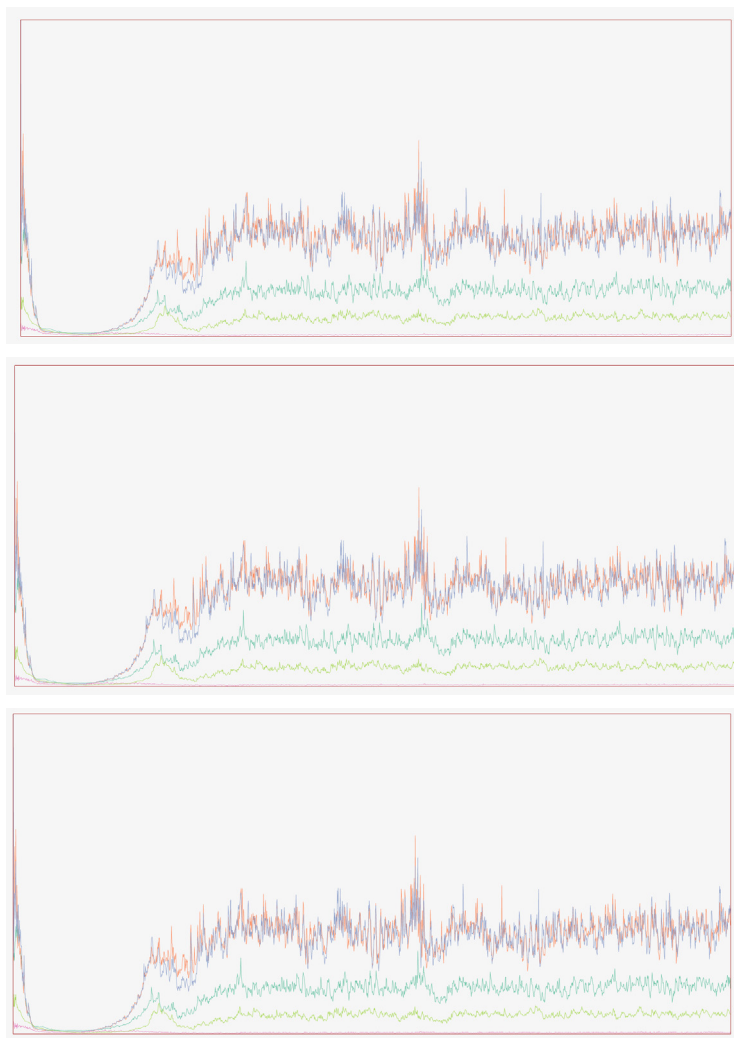
I grafici mostrano l'andamento longitudinale dei parametri principali lungo il condotto per i casi B7, B8 e B9 (*Grafico 6.3*), caratterizzati da geometria costante ( $L = 80$  m,  $W = 2$  m,  $H = 2$  m) e velocità di ingresso crescente (0.3, 0.5 e 1 m/s). In tutti i casi si osserva una fase iniziale di rapido adattamento del flusso, seguita da una regione centrale estesa con comportamento quasi stazionario, resa più evidente rispetto ai casi con lunghezza inferiore grazie allo sviluppo longitudinale maggiore.

L'andamento della velocità evidenzia un incremento progressivo passando da B7 a B9: nel caso B7 i valori medi si attestano intorno a 0.6–0.8 m/s, nel caso B8 tra circa 1.0–1.3 m/s, mentre nel caso B9 raggiungono valori medi di circa 1.6–1.9 m/s. In tutti i casi si osserva un'accelerazione significativa nella regione di uscita, con picchi prossimi a 4.5–5 m/s, associati alla contrazione del flusso e alla redistribuzione del campo di pressione.

Il campo di pressione mostra una diminuzione regolare lungo l'intero condotto, con perdite di carico crescenti all'aumentare della velocità: nel caso B7 si riscontrano valori complessivi dell'ordine di  $\approx 4.4$ – $4.6$  Pa, che aumentano nel caso B8 fino a circa  $\approx 4.6$ – $4.8$  Pa e nel caso B9 fino a circa  $\approx 4.7$ – $4.9$  Pa. La maggiore lunghezza del condotto comporta una distribuzione più graduale del gradiente di pressione rispetto ai casi con  $L = 50$  m, pur mantenendo una concentrazione della caduta nella zona terminale.

Dal punto di vista termico si osserva una riduzione progressiva dell'efficacia al crescere della velocità, ma con valori assoluti migliori rispetto ai casi più corti grazie alla maggiore lunghezza del condotto. Nel caso B7 la temperatura si riduce fino a circa 21–22 °C ( $\Delta T \approx 13$ – $14$  °C), nel caso B8 si attesta intorno a 22–23 °C ( $\Delta T \approx 12$ – $13$  °C), mentre nel caso B9 raggiunge valori di circa 22–23 °C con  $\Delta T$  leggermente inferiore ( $\approx 12$ – $13$  °C), mostrando come l'incremento di velocità riduca il tempo di scambio ma venga in parte compensato dall'estensione del canale.

Il confronto evidenzia quindi che, a parità di geometria, l'aumento della velocità comporta un incremento delle perdite di carico e una riduzione del raffrescamento, mentre la maggiore lunghezza del condotto consente di mantenere prestazioni termiche elevate anche a velocità intermedie. Il caso B7 massimizza lo scambio termico, il caso B9 privilegia la portata e la stabilità del flusso, mentre il caso B8 rappresenta una configurazione intermedia con buon equilibrio tra raffrescamento e perdite di carico.



**Grafico 6.3** Confronto dei profili longitudinali di velocità dell'aria, pressione e temperatura lungo il condotto per i casi B7\_L80\_W2\_H2\_V0.3, B8\_L80\_W2\_H2\_V0.5, B9\_L80\_W2\_H2\_V1, ottenuti variando la velocità di ingresso a parità di geometria ( $L = 50$  m, sezione  $2 \times 2$  m).

Fonte: K. Mitrik

**Legenda:**

- $U_x$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse X
- $U_y$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Y
- $U_z$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Z
- $p_{rgh}$  (Pa) pressione relativa corretta per l'effetto gravitazionale
- $T$  ( $^{\circ}\text{C}$  o K) temperatura del fluido
- $k$  ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) energia cinetica turbolenta

*Tabella 6.7 Fase B: Variazione della velocità dell'aria sui tre casi migliori. Analisi dell'influenza della velocità di ingresso (0.3–1.0 m/s) sui casi selezionati dalla Fase A. Sono riportati i principali parametri fluidodinamici e termici per valutare l'effetto della velocità su perdite di carico ( $\Delta P$ ) ed efficacia dello scambio termico ( $\Delta T$ ).  
Fonte: K. Mitrik*

#### 6.8.4. Analisi conclusiva dell'influenza della velocità e individuazione dei casi ottimali

La *Tabella 6.7* riporta i risultati sintetici delle simulazioni CFD relative alla Fase B, finalizzata all'analisi dell'influenza dei parametri geometrici del condotto sul comportamento del sistema TLVS. L'analisi comparativa dei nove casi simulati nella Fase B ha permesso di valutare in modo sistematico l'influenza della velocità dell'aria in ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico del sistema TLVS, mantenendo costanti le configurazioni geometriche selezionate nella fase precedente. L'analisi è stata condotta per gruppi omogenei di geometria, al fine di isolare l'effetto del-

| Codice            | Caso | Caso base | Lunghezza canale (m) | Sezione (m <sup>2</sup> ) | Profondità di posa (m) | Velocità aria in ingresso (m/s) | T aria ingresso (°C) | T suolo (°C) |
|-------------------|------|-----------|----------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------|
| B1_L30_W2_H2_V0.3 | B1   | A1        | 30                   | 4.0                       | 3                      | 0.3                             | 35                   | 15           |
| B2_L30_W2_H2_V0.5 | B2   | A1        | 30                   | 4.0                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| B3_L30_W2_H2_V1   | B3   | A1        | 30                   | 4.0                       | 3                      | 1.0                             | 35                   | 15           |
| B4_L50_W2_H2_V0.3 | B4   | A4        | 50                   | 4.0                       | 3                      | 0.3                             | 35                   | 15           |
| B5_L50_W2_H2_V0.5 | B5   | A4        | 50                   | 4.0                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| B6_L50_W2_H2_V1   | B6   | A4        | 50                   | 4.0                       | 3                      | 1.0                             | 35                   | 15           |
| B7_L80_W2_H2_V0.3 | B7   | A7        | 80                   | 4.0                       | 3                      | 0.3                             | 35                   | 15           |
| B8_L80_W2_H2_V0.5 | B8   | A7        | 80                   | 4.0                       | 3                      | 0.5                             | 35                   | 15           |
| B9_L80_W2_H2_V1   | B9   | A7        | 80                   | 4.0                       | 3                      | 1.0                             | 35                   | 15           |

| Codice            | Velocità media (m/s) | Velocità outlet (m/s) | Pressione inlet (Pa) | Pressione outlet (Pa) | $\Delta P$ perdita carico (Pa) | T media (°C) | T outlet (°C) | $\Delta T$ (°C) |
|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------|---------------|-----------------|
| B1_L30_W2_H2_V0.3 | 0.75                 | 2.1                   | 5.1                  | 0.45                  | 4.65                           | 26.0         | 19.5          | 15.5            |
| B2_L30_W2_H2_V0.5 | 1.45                 | 3.8                   | 5.1                  | 1.2                   | 3.9                            | 28.5         | 24.5          | 10.5            |
| B3_L30_W2_H2_V1   | 1.90                 | 4.8                   | 5.1                  | 0.6                   | 4.5                            | 11.5         | 7.0           | 28.0            |
| B4_L50_W2_H2_V0.3 | 0.95                 | 4.8                   | 5.1                  | 0.7                   | 4.4                            | 26.5         | 23.5          | 11.5            |
| B5_L50_W2_H2_V0.5 | 1.35                 | 4.8                   | 5.1                  | 0.7                   | 4.4                            | 26.5         | 23.5          | 11.5            |
| B6_L50_W2_H2_V1   | 2.25                 | 4.9                   | 5.3                  | 0.8                   | 4.5                            | 27.5         | 24.5          | 10.5            |
| B7_L80_W2_H2_V0.3 | 0.9                  | 4.8                   | 5.1                  | 0.5                   | 4.6                            | 25.5         | 22.5          | 12.5            |
| B8_L80_W2_H2_V0.5 | 1.3                  | 4.8                   | 5.2                  | 0.6                   | 4.6                            | 26.5         | 23.5          | 11.5            |
| B9_L80_W2_H2_V1   | 1.75                 | 4.8                   | 5.3                  | 0.5                   | 4.8                            | 26.5         | 22.5          | 12.5            |

la velocità e garantire la confrontabilità dei risultati. Nel primo gruppo di casi (**B1, B2, B3**), caratterizzato da lunghezza del condotto pari a 30 m, si osserva che l'aumento della velocità comporta un incremento della velocità media interna e delle perdite di carico ( $\Delta P$  fino a circa 4.8 Pa), accompagnato da una progressiva riduzione del salto termico, che passa da circa 12–13 °C nel caso B1 a circa 10–11 °C nel caso B3. Il comportamento evidenzia come, per condotti di lunghezza ridotta, l'incremento della velocità penalizzi significativamente l'efficacia dello scambio termico. Nel secondo gruppo (**B4, B5, B6**), con lunghezza pari a 50 m, si osserva un andamento analogo, ma con una distribuzione più uniforme dei parametri lungo il condotto. Il caso B4 ( $V = 0.3$  m/s) garantisce i migliori risultati in termini di raffrescamento ( $\Delta T \approx 12\text{--}13$  °C), mentre nei casi B5 e B6 si registra una progressiva riduzione dell'efficacia termica ( $\Delta T \approx 11\text{--}12$  °C e  $\approx 10\text{--}11$  °C), accompagnata da un aumento delle perdite di carico. La maggiore lunghezza consente tuttavia di mantenere un buon livello di scambio anche a velocità intermedie. Nel terzo gruppo (**B7, B8, B9**), caratterizzato da lunghezza pari a 80 m, l'effetto della velocità risulta parzialmente compensato dall'estensione del condotto. Il caso B7 ( $V = 0.3$  m/s) raggiunge il massimo raffrescamento tra tutti i casi analizzati ( $\Delta T \approx 13\text{--}14$  °C), mentre i casi B8 e B9 mantengono valori di  $\Delta T$  ancora elevati ( $\approx 12\text{--}13$  °C), pur in presenza di velocità maggiori e perdite di carico più elevate. In questo gruppo si evidenzia come l'aumento della lunghezza consenta di preservare l'efficacia termica anche al crescere della velocità. Dall'analisi complessiva emerge quindi un chiaro comportamento sistematico: all'interno di ciascun gruppo, l'aumento della velocità comporta una riduzione del raffrescamento e un incremento delle perdite di carico, mentre l'aumento della lunghezza del condotto consente di migliorare l'efficacia dello scambio termico e di compensare parzialmente gli effetti negativi legati alla velocità.

Tra tutte le configurazioni analizzate, emergono come soluzioni più significative i casi:

**B7** (80 m, 2×2 m, 0.3 m/s) → massima efficacia termica;

**B8** (80 m, 2×2 m, 0.5 m/s) → miglior compromesso tra raffrescamento e perdite di carico;

**B9** (80 m, 2×2 m, 1 m/s) → configurazione a maggiore capacità di trasporto del flusso.

Questi tre casi rappresentano le configurazioni più rilevanti per la fase successiva, che sarà dedicata all'analisi approfondita delle configurazioni selezionate.



## 6.9 Simulazioni CFD: Fase C \_ variazione delle aperture per l'ingresso e l'uscita del flusso d'aria sui casi migliori

La terza fase dell'analisi è dedicata allo studio dell'influenza delle condizioni di ingresso e uscita del flusso d'aria sulle prestazioni del sistema TLVS. In particolare, l'attenzione è stata posta sulla variazione dell'area delle aperture, parametro che incide in modo diretto sulle perdite di carico localizzate e sulla distribuzione del campo di velocità all'interno del condotto. Le aperture di ingresso e di uscita sono state assunte di uguale dimensione per ciascuna configurazione analizzata, in modo da valutare in maniera univoca l'effetto della variazione della sezione di passaggio sulle prestazioni del sistema. Tale scelta consente di mantenere un'impostazione parametrica controllata e di attribuire le differenze riscontrate esclusivamente alla variazione dell'area delle aperture. L'analisi è stata condotta a partire dalle configurazioni più significative individuate nella fase parametrica precedente, corrispondenti ai casi B7, B8 e B9, rappresentativi rispettivamente di condizioni di massimo raffrescamento, comportamento bilanciato e massima portata. Per ciascuno di tali casi, sono state considerate tre diverse configurazioni delle aperture, pari a 1 m<sup>2</sup>, 2 m<sup>2</sup> e 4 m<sup>2</sup>, mantenendo invariati tutti gli altri parametri geometrici e operativi del sistema.

*Tabella 6.8 Selezione dei casi della Fase C e definizione delle configurazioni di riferimento. Elenco dei nove casi analizzati con variazione dell'area di apertura (1–4 m<sup>2</sup>), organizzati a partire dai tre migliori casi complessivi individuati nelle fasi precedenti. La tabella costituisce la base per la selezione dei casi rappresentativi (C1, C2, C9) utilizzati nelle fasi avanzate di analisi.*  
Fonte: K. Mitrik

| Codice               | Caso | Configurazione base        | Area apertura (m <sup>2</sup> ) |
|----------------------|------|----------------------------|---------------------------------|
| C1_L80_W2_H2_V0.3_A1 | C1   | Miglior caso complessivo 1 | 1                               |
| C2_L80_W2_H2_V0.3_A2 | C2   | Miglior caso complessivo 1 | 2                               |
| C3_L80_W2_H2_V0.3_A4 | C3   | Miglior caso complessivo 1 | 4                               |
| C4_L80_W2_H2_V0.5_A1 | C4   | Miglior caso complessivo 2 | 1                               |
| C5_L80_W2_H2_V0.5_A2 | C5   | Miglior caso complessivo 2 | 2                               |
| C6_L80_W2_H2_V0.5_A4 | C6   | Miglior caso complessivo 2 | 4                               |
| C7_L80_W2_H2_V1_A1   | C7   | Miglior caso complessivo 3 | 1                               |
| C8_L80_W2_H2_V1_A2   | C8   | Miglior caso complessivo 3 | 2                               |
| C9_L80_W2_H2_V1_A4   | C9   | Miglior caso complessivo 3 | 4                               |

### Caso C1\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A1

Il caso C1\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A1, caratterizzato da un'area delle aperture pari a  $1 \text{ m}^2$ , rappresenta la configurazione con la maggiore restrizione del flusso tra quelle analizzate. L'analisi dei campi termo-fluidodinamici evidenzia un comportamento fortemente influenzato dalla riduzione della sezione di ingresso e uscita. Il campo di temperatura mostra una marcata discontinuità nella zona iniziale del condotto, dove si osserva un rapido passaggio dalla temperatura dell'aria in ingresso, pari a  $35^\circ\text{C}$ , a valori significativamente inferiori già nei primi metri. Il gradiente termico risulta particolarmente elevato in questa regione, indicando un intenso scambio termico iniziale favorito dall'elevata differenza di temperatura tra aria e suolo. Lungo il condotto, la temperatura decresce progressivamente fino a raggiungere in uscita valori prossimi a  $19.5^\circ\text{C}$ , con una variazione complessiva  $\Delta T$  pari a circa  $15.5^\circ\text{C}$ . Nella zona centrale del canale, il campo termico assume un andamento più uniforme, segno del raggiungimento di condizioni quasi stazionarie.



Dal punto di vista fluidodinamico, il campo di pressione evidenzia una perdita complessiva pari a circa  $4.65 \text{ Pa}$ , con una pressione in ingresso di circa  $5.1 \text{ Pa}$  e in uscita di circa  $0.45 \text{ Pa}$ . È particolarmente significativo osservare come una parte rilevante della caduta di pressione si concentri nella zona iniziale del condotto, in corrispondenza della restrizione geometrica. Tale comportamento è attribuibile alla presenza di perdite localizzate dovute alla contrazione del flusso, mentre lungo il tratto centrale la pressione decresce in modo più regolare per effetto delle perdite distribuite.



Il campo di velocità conferma l'influenza della ridotta area di apertura, mostrando un'evidente accelerazione del flusso in ingresso, con valori che raggiungono circa  $2.1 \text{ m/s}$ , a fronte di una velocità media nel condotto pari a circa  $0.75 \text{ m/s}$ . Dopo la sezione di ingresso, il flusso tende progressivamente a redistribuirsi, assumendo un profilo più uniforme nella regione centrale. Tuttavia, la presenza della restrizione iniziale determina una distribuzione meno omogenea rispetto ai casi con aperture più ampie. In prossimità dell'uscita si osserva nuovamente un incremento della velocità, con valori che raggiungono circa  $4.8\text{--}5 \text{ m/s}$ , in accor-

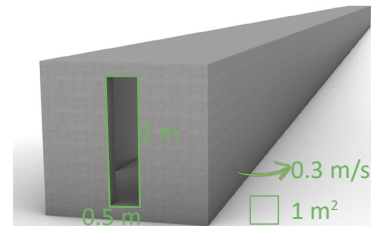


Figura 6.96 Modello baseline caso C1\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A1.

Fonte: K. Mitrik

Figura 6.97 Caso C1\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A1 - Distribuzione della temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.98 Caso C1\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A1 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

**Figura 6.99** Caso C1\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A1 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

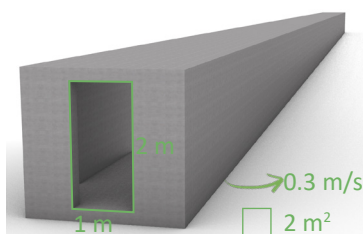
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

do con gli effetti di accelerazione dovuti alla sezione terminale.



Il caso C1 evidenzia come una riduzione significativa dell'area delle aperture comporti un peggioramento delle prestazioni fluidodinamiche del sistema, con un aumento delle perdite di carico e una maggiore non uniformità del campo di velocità. Dal punto di vista termico, la configurazione garantisce comunque una variazione di temperatura elevata, ma tale risultato è principalmente legato alla lunghezza del condotto piuttosto che alla configurazione delle aperture. Ne consegue che aperture eccessivamente ridotte non risultano vantaggiose in termini complessivi, in quanto penalizzano il comportamento fluidodinamico senza apportare benefici significativi allo scambio termico.

#### Caso C2\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A2



**Figura 6.100** Modello baseline caso C2\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A2.  
Fonte: K. Mitrik

Il caso C2\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A2, caratterizzato da un'area delle aperture pari a 2 m<sup>2</sup>, rappresenta una configurazione intermedia tra la condizione fortemente restrittiva del caso C1 e quella completamente aperta del caso C3. L'analisi dei campi termo-fluidodinamici evidenzia un comportamento più equilibrato, con una riduzione degli effetti localizzati tipici delle aperture di dimensioni ridotte.

Il campo di temperatura mostra un andamento regolare lungo l'intero sviluppo del condotto. Nella zona di ingresso si osserva una diminuzione della temperatura meno brusca rispetto al caso C1, indicando un gradiente termico iniziale più contenuto. La temperatura decresce progressivamente lungo il canale, passando dai 35 °C in ingresso a valori prossimi a 22.5 °C in uscita, con una variazione complessiva  $\Delta T$  pari a circa 12.5 °C. La distribuzione termica nella zona centrale risulta uniforme e priva di discontinuità marcate, segno di un regime di scambio ben stabilizzato.



**Figura 6.101** Caso C2\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A2 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Dal punto di vista fluidodinamico, il campo di pressione evidenzia una perdita complessiva pari a circa 4.6 Pa, con valori che passano da circa 5.1 Pa in ingresso a circa 0.5 Pa in uscita. A differenza del caso C1, la caduta di pressione nella zona iniziale risulta meno pronunciata, indicando una riduzione delle perdite localizzate dovute alla contrazione del flusso. L'andamento lungo il condotto appare più lineare, con una distribuzione regolare delle perdite distribuite.



Il campo di velocità conferma tale comportamento, mostrando una minore accelerazione del flusso in ingresso rispetto al caso con apertura più ridotta. La velocità media nel condotto si attesta intorno a 0.9 m/s, mentre i valori locali risultano più uniformemente distribuiti lungo la sezione. Nella zona centrale il flusso appare ben sviluppato e stabile, con una distribuzione omogenea delle linee di corrente. In prossimità dell'uscita si osserva un incremento della velocità, con valori che raggiungono circa 4.8–5 m/s, coerente con gli effetti di accelerazione nella sezione terminale.



Il caso C2 evidenzia un comportamento più equilibrato rispetto al caso C1. L'aumento dell'area delle aperture riduce significativamente le perdite localizzate e migliora l'uniformità del campo di velocità, senza compromettere in maniera sostanziale le prestazioni termiche. La diminuzione della variazione di temperatura rispetto al caso con apertura ridotta è attribuibile al minor effetto di accelerazione iniziale e alla conseguente riduzione delle interazioni locali intense, ma il sistema mantiene comunque un buon livello di raffreddamento. Tale configurazione rappresenta quindi un compromesso efficace tra prestazioni fluidodinamiche e termiche, risultando particolarmente adatta come riferimento per l'ottimizzazione complessiva del sistema.

#### Caso C3\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A4

Il caso C3\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A4, caratterizzato da un'area delle aperture pari a 4 m<sup>2</sup>, rappresenta la configurazione con sezione completamente aperta, coincidente con quella del condotto. In questa condizione vengono minimizzati gli effetti di contrazione del flusso, consentendo di analizzare il comportamento del sistema in assenza di restrizioni geometriche all'ingresso e all'uscita.

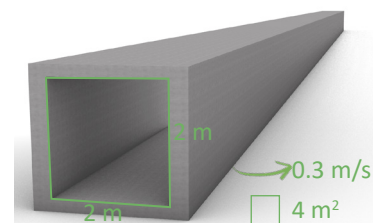
Il campo di velocità evidenzia una distribuzione particolarmente uniforme lungo l'intero sviluppo del condotto. A differenza dei casi precedenti, non si osservano accelerazioni significative nella zona di ingresso, e la velocità si mantiene prossima ai valori medi già dalle prime sezioni. La velocità media risulta dell'ordine di circa 0.9–1.0 m/s, mentre i picchi localizzati sono meno pronunciati rispetto ai casi con aperture ridotte. An-

**Figura 6.102** Caso C2\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A2 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

**Figura 6.103** Caso C2\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A2 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



**Figura 6.104** Modello baseline caso C3\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A4.

Fonte: K. Mitrik

**Figura 6.105** Caso C3\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A4 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Il campo di pressione mostra un andamento regolare e progressivo lungo il condotto, con una perdita di carico complessiva pari a circa 4.6 Pa. La distribuzione della pressione risulta più uniforme rispetto al caso C1, con una riduzione significativa delle perdite localizzate nella zona di ingresso. Il comportamento è dominato principalmente dalle perdite distribuite lungo il canale, mentre il contributo delle condizioni al contorno risulta trascurabile.

**Figura 6.106** Caso C3\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A4 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Dal punto di vista termico, il campo di temperatura evidenzia un andamento progressivo e uniforme, privo di discontinuità marcate nella zona iniziale. La temperatura decresce lungo il condotto in modo regolare, passando da 35 °C in ingresso a valori prossimi a 22–23 °C in uscita, con una variazione complessiva  $\Delta T$  pari a circa 11.5–12.5 °C. Rispetto al caso C1, il gradiente iniziale risulta meno accentuato, a causa dell'assenza di elevate velocità locali, mentre il comportamento complessivo risulta simile al caso C2.

**Figura 6.107** Caso C3\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A4 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Il caso C3 rappresenta la configurazione fluidodinamicamente più efficiente, in quanto garantisce una distribuzione del flusso uniforme e una riduzione delle perdite localizzate. Tuttavia, l'assenza di accelerazioni iniziali comporta un leggero decremento delle prestazioni termiche rispetto al caso con aperture ridotte. Il confronto con il caso C2 evidenzia come l'aumento dell'area oltre un certo valore non produca benefici significativi, suggerendo l'esistenza di una condizione limite oltre la quale il comportamento del sistema tende a stabilizzarsi.

### 6.9.1 Influenza dell'apertura di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi C1–C2–C3)

Il confronto tra i casi C1, C2 e C3 (*Grafico 6.8*) consente di valutare in modo diretto l'influenza dell'area delle aperture sul comportamento termo-fluidodinamico del sistema, mantenendo costanti le condizioni geometriche e operative del condotto. Dal punto di vista fluidodinamico, la configurazione con apertura ridotta (C1,  $A = 1 \text{ m}^2$ ) evidenzia una maggiore irregolarità dei profili lungo il condotto, con oscillazioni più marcate e picchi localizzati riconducibili alla forte contrazione del flusso in ingresso. Tale comportamento è associato a un incremento delle perdite localizzate e a una distribuzione meno uniforme del campo di velocità. Al contrario, nel caso C3 ( $A = 4 \text{ m}^2$ ) i profili risultano più stabili e regolari, indicando una riduzione delle perturbazioni indotte dalle condizioni al contorno. Il caso intermedio C2 ( $A = 2 \text{ m}^2$ ) mostra un comportamento transitorio tra i due estremi, con una significativa attenuazione delle discontinuità rispetto a C1. L'andamento delle perdite di carico riflette chiaramente tale tendenza: nel caso C1 si osserva una maggiore incidenza delle perdite localizzate nella zona iniziale, mentre nei casi C2 e C3 il contributo delle perdite distribuite diventa predominante. La differenza tra C2 e C3, tuttavia, risulta meno marcata rispetto al salto tra C1 e C2, suggerendo che oltre una certa area di apertura il beneficio fluidodinamico tende a stabilizzarsi. Dal punto di vista termico, i tre casi mostrano comportamenti complessivamente simili lungo la maggior parte del condotto, con una riduzione progressiva della temperatura e un regime quasi uniforme nella zona centrale. Tuttavia, il caso C1 evidenzia un gradiente iniziale più accentuato, legato alle maggiori velocità locali indotte dalla restrizione. Nei casi C2 e C3 tale effetto risulta attenuato, con una distribuzione termica più uniforme fin dalle prime sezioni. In termini quantitativi, la variazione di temperatura tende a diminuire leggermente all'aumentare dell'area delle aperture, passando da circa  $15.5 \text{ °C}$  nel caso C1 a valori prossimi a  $12\text{--}12.5 \text{ °C}$  nei casi C2 e C3.

Nel complesso, l'aumento dell'area delle aperture comporta un miglioramento significativo del comportamento fluidodinamico, riducendo le perdite localizzate e favorendo una maggiore uniformità del flusso, mentre l'impatto sulle prestazioni termiche risulta secondario. Il caso C2 rappresenta una configurazione di equilibrio, in grado di limitare le penalizzazioni fluidodinamiche senza ridurre in modo significativo l'efficacia dello scambio termico, mentre il caso C3 conferma la tendenza alla stabilizzazione del sistema per aperture più ampie.



**Grafico 6.8** Confronto dei profili longitudinali di velocità dell'aria, pressione e temperatura lungo il condotto per i casi C1\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A1, C2\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A2, C3\_L80\_W2\_H2\_V0.3\_A4, ottenuti variando l'apertura di ingresso (Area apertura (1m<sup>2</sup>- 2m<sup>2</sup>- 4m<sup>2</sup>). Fonte: K. Mitrik

**Legenda:**

- $U_x$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse X
- $U_y$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Y
- $U_z$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Z
- $p_{rgh}$  (Pa) pressione relativa corretta per l'effetto gravitazionale
- $T$  (°C o K) temperatura del fluido
- $k$  (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) energia cinetica turbolenta



### Caso C4\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A1

Il caso C4\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A1 rappresenta una configurazione caratterizzata da velocità intermedia dell'aria in ingresso (0.5 m/s) e area delle aperture ridotta (1 m<sup>2</sup>). Rispetto ai casi precedenti a bassa velocità, l'aumento della portata modifica in modo significativo il comportamento del sistema, amplificando gli effetti fluidodinamici associati alla restrizione geometrica. Il campo di velocità evidenzia una marcata accelerazione del flusso nella zona di ingresso, più pronunciata rispetto al caso C1 a causa della maggiore velocità imposta. I valori locali risultano elevati già nelle prime sezioni del condotto e la redistribuzione del flusso richiede una lunghezza maggiore per raggiungere condizioni quasi uniformi. Nella zona centrale il profilo si stabilizza, ma permane una maggiore variabilità rispetto ai casi con aperture più ampie. In prossimità dell'uscita si osserva un incremento significativo della velocità, con valori prossimi a 4.8–5 m/s, associato agli effetti combinati della sezione terminale e della maggiore energia cinetica del flusso.



Figura 6.108 Modello baseline caso C4\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A1.

Fonte: K. Mitrik

Il campo di pressione riflette tali dinamiche, mostrando una perdita di carico complessiva dell'ordine di circa 4.4–4.5 Pa. La caduta di pressione risulta particolarmente concentrata nella zona iniziale, dove la restrizione dell'apertura induce perdite localizzate rilevanti. Rispetto ai casi a bassa velocità, l'aumento della portata accentua tali effetti, rendendo più evidente il contributo della contrazione del flusso. Lungo il tratto centrale del condotto la pressione decresce in maniera più regolare, dominata dalle perdite distribuite.

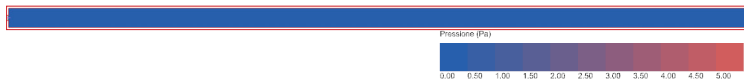


Figura 6.109 Caso C4\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A1 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Il campo di temperatura mostra un andamento progressivo lungo il condotto, con una riduzione meno marcata rispetto ai casi a bassa velocità. La temperatura passa dai 35 °C in ingresso a valori prossimi a 24–25 °C in uscita, con una variazione complessiva  $\Delta T$  dell'ordine di circa 10–11 °C. Il gradiente termico risulta meno concentrato nella zona iniziale rispetto al caso C1, evidenziando come l'aumento della velocità riduca l'intensità dello scambio termico locale. La distribuzione termica nella zona centrale appare uniforme, segno del raggiungimento di condizioni quasi stazionarie.

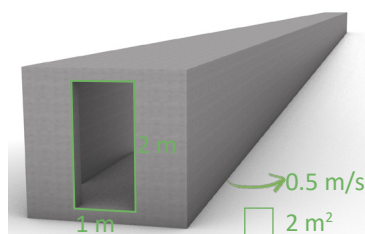


Figura 6.110 Caso C4\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A1 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.111 Caso C4\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A1 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



**Figura 6.112** Modello baseline caso C5\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A2.

Fonte: K. Mitrik

**Figura 6.113** Caso C5\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A2 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

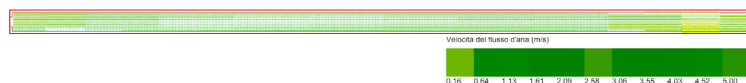
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

**Figura 6.114** Caso C5\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A2 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

#### Caso C5\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A2

Il caso C5\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A2 rappresenta una configurazione caratterizzata da velocità intermedia dell'aria (0.5 m/s) e area delle aperture pari a 2 m<sup>2</sup>, corrispondente a una condizione intermedia tra la forte restrizione del caso C4 e la configurazione completamente aperta del caso C6. Tale combinazione consente di valutare l'effetto dell'aumento dell'area delle aperture in presenza di una portata significativa. Il campo di velocità evidenzia una distribuzione più regolare rispetto al caso C4. L'accelerazione del flusso nella zona di ingresso risulta meno marcata, con valori locali inferiori e una più rapida stabilizzazione del profilo lungo il condotto. La velocità media si attesta intorno a valori prossimi a 1.3 m/s, mentre nella zona centrale il flusso appare ben sviluppato e uniforme. In prossimità dell'uscita si osserva un incremento della velocità fino a valori dell'ordine di 4.8–5 m/s, ma con una distribuzione più omogenea rispetto al caso con apertura ridotta.

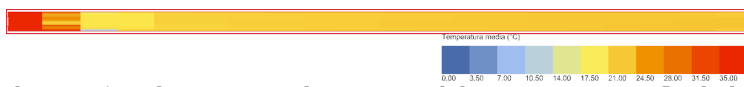


Dal punto di vista della pressione, la perdita di carico complessiva si mantiene su valori pari a circa 4.4–4.5 Pa, con un andamento più lineare lungo il condotto. La riduzione dell'intensità della contrazione in ingresso comporta una diminuzione delle perdite localizzate rispetto al caso C4, rendendo più evidente il contributo delle perdite distribuite. Il campo di pressione risulta quindi più regolare e privo di brusche variazioni nelle prime sezioni.



Il campo di temperatura mostra un comportamento coerente con l'aumento della velocità dell'aria. La riduzione della temperatura lungo il condotto avviene in maniera progressiva, passando dai 35 °C in ingresso a valori prossimi a 23–24 °C in uscita, con una varia-

zione complessiva  $\Delta T$  dell'ordine di circa 10.5–11.5 °C. Il gradiente termico iniziale risulta meno accentuato rispetto ai casi a velocità inferiore, mentre la distribuzione lungo il tratto centrale appare uniforme e stabile.



Il caso C5 evidenzia un miglioramento del comportamento fluidodinamico rispetto al caso C4, grazie all'aumento dell'area delle aperture che riduce le perdite localizzate e favorisce una distribuzione più uniforme del flusso. Tuttavia, le prestazioni termiche rimangono limitate dalla velocità dell'aria, che riduce il tempo di permanenza nel condotto. Tale configurazione rappresenta quindi un buon compromesso fluidodinamico, ma non ottimale dal punto di vista dello scambio termico.

#### Caso C6\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A4

Il caso C6 rappresenta la configurazione con velocità intermedia dell'aria (0.5 m/s) e area delle aperture pari a 4 m<sup>2</sup>, corrispondente alla sezione completa del condotto. In questa condizione vengono eliminati gli effetti di restrizione in ingresso e in uscita, consentendo al flusso di svilupparsi in maniera più regolare fin dalle prime sezioni. Il campo di velocità evidenzia una distribuzione uniforme lungo l'intero sviluppo del condotto, senza accelerazioni significative nella zona di ingresso. Il flusso si presenta ben sviluppato già nelle prime sezioni e mantiene una buona omogeneità nella regione centrale. In prossimità dell'uscita si osserva un incremento della velocità, con valori che raggiungono circa 4.8–5 m/s, ma con una distribuzione più stabile rispetto ai casi con aperture ridotte. La velocità media risulta dell'ordine di circa 1.7–1.8 m/s, coerente con l'assenza di vincoli geometrici.

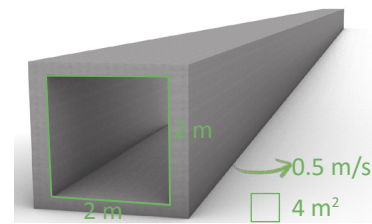


Il campo di pressione mostra un andamento regolare lungo il condotto, con una perdita di carico complessiva pari a circa 4.5 Pa. A differenza dei casi C4 e, in misura minore, C5, la caduta di pressione nella zona iniziale risulta trascurabile, indicando l'assenza di perdite localizzate significative. Il comportamento è dominato dalle perdite distribuite lungo il canale, con un profilo di pressione progressivo e uniforme.



**Figura 6.115** Caso C5\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A2 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



**Figura 6.116** Modello baseline caso C6\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A4.

Fonte: K. Mitrik

**Figura 6.117** Caso C6\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A4 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

**Figura 6.118** Caso C6\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A4 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Dal punto di vista termico, il campo di temperatura evidenzia una riduzione graduale lungo il condotto, con un andamento regolare e privo di discontinuità nella zona iniziale. La temperatura passa dai 35 °C in ingresso a valori prossimi a 24–25 °C in uscita, con una variazione complessiva  $\Delta T$  pari a circa 10–10.5 °C. Rispetto ai casi C4 e C5, il gradiente termico risulta leggermente meno accentuato, a causa della maggiore velocità media del flusso, che riduce ulteriormente il tempo di permanenza e quindi l'efficacia dello scambio termico.

*Figura 6.119 Caso C5\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A2 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.*

*Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).*



Il caso C6 rappresenta la configurazione fluidodinamicamente più efficiente all'interno del gruppo a velocità intermedia, grazie all'assenza di perdite localizzate e alla maggiore uniformità del flusso. Tuttavia, tale configurazione risulta penalizzata dal punto di vista termico, confermando che l'aumento dell'area delle aperture, pur migliorando il comportamento fluidodinamico, comporta una progressiva riduzione delle prestazioni di raffrescamento.

### 6.9.2 Influenza dell'apertura di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi C4–C5–C6)

Il confronto tra i casi C4, C5 e C6 (*Grafico 6.9*) consente di analizzare l'influenza dell'area delle aperture in condizioni operative caratterizzate da velocità dell'aria più elevate rispetto ai casi precedenti, mantenendo costanti le principali caratteristiche geometriche del condotto. In questo contesto, l'effetto dell'apertura si combina con un regime fluidodinamico più energetico, evidenziando dinamiche differenti rispetto ai casi a bassa velocità.

Dal punto di vista fluidodinamico, il caso C4 ( $A = 1 \text{ m}^2$ ) presenta un comportamento fortemente instabile lungo il condotto, con oscillazioni di velocità molto marcate e frequenti picchi localizzati. La restrizione in ingresso, associata alla maggiore velocità, genera un flusso altamente turbolento, con evidenti discontinuità soprattutto nelle prime sezioni. Questo si traduce in un incremento significativo delle perdite di carico, dominate da effetti localizzati che si propagano lungo l'intero sviluppo del condotto.

Nel caso C6 ( $A = 4 \text{ m}^2$ ), al contrario, si osserva una maggiore regolarità dei profili, con una riduzione delle oscillazioni e una distribuzione del campo di velocità più uniforme. L'aumento dell'area di ingresso consente infatti di mitigare gli effetti della contrazione, riducendo le perturbazioni iniziali e favorendo un regime più stabile. Il caso intermedio C5 ( $A = 2 \text{ m}^2$ ) mostra un comportamento di transizione, con una parziale attenuazione delle instabilità rispetto a C4, ma ancora caratterizzato da fluttuazioni rilevanti, soprattutto nelle zone centrali del condotto.

L'andamento delle perdite di carico riflette chiaramente tali differenze: nel caso C4 si osserva un contributo elevato delle perdite localizzate, amplificato dalla combinazione tra elevata velocità e ridotta sezione di ingresso. Nei casi C5 e C6, invece, si assiste a una progressiva riduzione di tali effetti, con una maggiore incidenza delle perdite distribuite e un comportamento complessivamente più prevedibile. Tuttavia, anche nel caso C6 le perdite restano superiori rispetto ai casi a velocità inferiori, a conferma del ruolo dominante della velocità nel bilancio fluidodinamico.

Dal punto di vista termico, i tre casi mostrano un comportamento più omogeneo rispetto alla componente fluidodinamica. In tutte le configurazioni si osserva una riduzione della temperatura lungo il condotto, con un rapido adattamento nelle prime sezioni seguito da un regime quasi stazionario nella parte centrale. Tuttavia, nel caso C4 si evidenzia un gradiente termico iniziale più accentuato, dovuto alle elevate velocità locali e al maggiore rimescolamento del flusso.



Nei casi C5 e C6 tale effetto risulta progressivamente attenuato, con una distribuzione della temperatura più uniforme lungo l'intero sviluppo del condotto.

In termini quantitativi, la variazione di temperatura risulta leggermente inferiore rispetto ai casi a bassa velocità, attestandosi su valori medi dell'ordine di 10–12 °C. Le differenze tra C5 e C6 risultano contenute, mentre il caso C4 mostra una maggiore variabilità locale, senza tuttavia tradursi in un miglioramento significativo delle prestazioni termiche.

**Grafico 6.9** Confronto dei profili longitudinali di velocità dell'aria, pressione e temperatura lungo il condotto per i casi C4\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A1, C5\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A2, C6\_L80\_W2\_H2\_V0.5\_A4, ottenuti variando l'apertura di ingresso (Area apertura (1m<sup>2</sup>- 2m<sup>2</sup>- 4m<sup>2</sup>). Fonte: K. Mitrik

**Legenda:**

- $U_x$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse X
- $U_y$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Y
- $U_z$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Z
- $p_{rgh}$  (Pa) pressione relativa corretta per l'effetto gravitazionale
- $T$  (°C o K) temperatura del fluido
- $k$  (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) energia cinetica turbolenta



### Caso C7\_L80\_W2\_H2\_V1\_A1

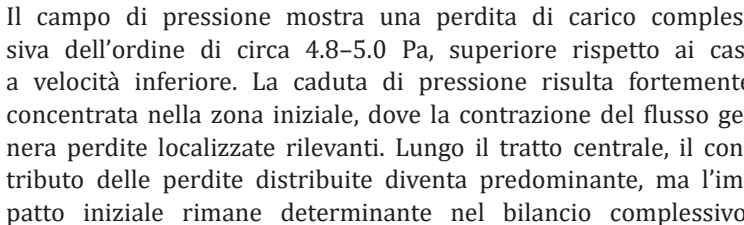
Il caso C7\_L80\_W2\_H2\_V1\_A1 rappresenta la configurazione con velocità elevata dell'aria in ingresso (1 m/s) e area delle aperture ridotta (1 m<sup>2</sup>). Tale combinazione costituisce la condizione più critica dal punto di vista fluidodinamico, in quanto l'elevata portata si associa a una forte restrizione geometrica.

Il campo di velocità evidenzia una marcata accelerazione del flusso nella zona di ingresso, significativamente più intensa rispetto ai casi precedenti. Le elevate velocità locali generano una distribuzione fortemente non uniforme nelle prime sezioni del condotto, con una zona di adattamento più estesa. Il flusso tende a stabilizzarsi lungo il tratto centrale, ma mantiene una variabilità significativa. In prossimità dell'uscita si osservano valori molto elevati, con picchi che raggiungono circa 5 m/s, associati alla combinazione tra elevata energia cinetica e sezione terminale.



Figura 6.120 Modello baseline caso C7\_L80\_W2\_H2\_V1\_A1.

Fonte: K. Mitrik



Il campo di pressione mostra una perdita di carico complessiva dell'ordine di circa 4.8–5.0 Pa, superiore rispetto ai casi a velocità inferiore. La caduta di pressione risulta fortemente concentrata nella zona iniziale, dove la contrazione del flusso genera perdite localizzate rilevanti. Lungo il tratto centrale, il contributo delle perdite distribuite diventa predominante, ma l'impatto iniziale rimane determinante nel bilancio complessivo.



Dal punto di vista termico, il campo di temperatura evidenzia una riduzione lungo il condotto meno accentuata rispetto ai casi a velocità inferiore. La temperatura passa dai 35 °C in ingresso a valori prossimi a 22–23 °C in uscita, con una variazione complessiva  $\Delta T$  dell'ordine di circa 12–12.5 °C. Nonostante la maggiore velocità riduca il tempo di permanenza, la presenza di elevate velocità locali nella zona iniziale favorisce un raffreddamento più intenso nelle prime sezioni. Tuttavia, lungo il tratto centrale il gradiente termico risulta più contenuto e tende a stabilizzarsi rapidamente.



Figura 6.121 Caso C7\_L80\_W2\_H2\_V1\_A1 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

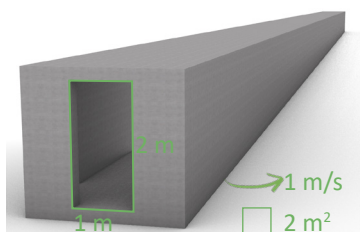
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.122 Caso C7\_L80\_W2\_H2\_V1\_A1 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.123 Caso C7\_L80\_W2\_H2\_V1\_A1 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



**Figura 6.124** Modello baseline caso C8\_L80\_W2\_H2\_V1\_A2.  
Fonte: K. Mitrik

**Figura 6.125** Caso C8\_L80\_W2\_H2\_V1\_A2 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

**Figura 6.126** Caso C8\_L80\_W2\_H2\_V1\_A2 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

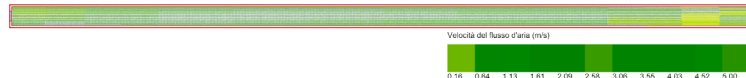
**Figura 6.127** Caso C8\_L80\_W2\_H2\_V1\_A2 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

### Caso C8\_L80\_W2\_H2\_V1\_A2

Il caso C8 rappresenta una configurazione caratterizzata da velocità elevata dell'aria in ingresso (1 m/s) e area delle aperture pari a 2 m<sup>2</sup>. Rispetto al caso C7, l'aumento della sezione di ingresso e uscita consente una sensibile riduzione degli effetti di contrazione del flusso, pur mantenendo le caratteristiche proprie di un regime ad alta portata.

Il campo di velocità evidenzia una distribuzione più regolare rispetto al caso con apertura ridotta. L'accelerazione iniziale risulta meno intensa e il flusso tende a stabilizzarsi più rapidamente lungo il condotto. Nella zona centrale la distribuzione appare relativamente uniforme, mentre in uscita si osserva un incremento della velocità con valori ancora prossimi a 4.8–5 m/s, ma con minore concentrazione locale rispetto al caso C7. La maggiore area di apertura riduce quindi le disomogeneità del campo di moto, pur in presenza di una velocità media elevata.



Dal punto di vista della pressione, il comportamento risulta più regolare, con una perdita di carico complessiva dell'ordine di circa 4.6 Pa. La caduta di pressione nella regione iniziale è meno accentuata rispetto al caso C7, a conferma della riduzione delle perdite localizzate dovute alla contrazione. Lungo il resto del condotto la pressione decresce in modo progressivo, con una distribuzione dominata prevalentemente dalle perdite distribuite.



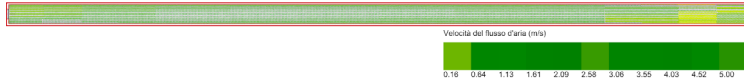
Il campo di temperatura mostra un andamento graduale e uniforme lungo il canale. La temperatura dell'aria si riduce dai 35 °C in ingresso a valori prossimi a 22–23 °C in uscita, con una variazione complessiva  $\Delta T$  dell'ordine di circa 11.5 °C. Il raffreddamento risulta meno concentrato nella zona iniziale rispetto al caso C7, mentre lungo il tratto centrale si osserva un andamento termico stabile, coerente con una maggiore uniformità del flusso.



### Caso C9\_L80\_W2\_H2\_V1\_A4

Il caso C9 rappresenta la configurazione con velocità elevata dell'aria in ingresso (1 m/s) e area delle aperture pari a 4 m<sup>2</sup>, coincidente con la sezione completa del condotto. In questa condizione gli effetti di contrazione del flusso risultano sostanzialmente assenti e il comportamento del sistema è governato principalmente dalla portata elevata e dalle perdite distribuite lungo il canale.

Il campo di velocità evidenzia una distribuzione particolarmente uniforme lungo gran parte del condotto, con un profilo ben sviluppato già nelle prime sezioni. Rispetto ai casi C7 e C8, la maggiore area di apertura consente una riduzione quasi completa delle disomogeneità locali nella zona iniziale, mentre l'accelerazione più evidente si concentra in prossimità dell'uscita, dove i valori raggiungono circa 5 m/s. La velocità media risulta quindi più elevata rispetto agli altri casi del gruppo, coerentemente con la minore resistenza imposta dalle aperture.



Il campo di pressione mostra un andamento regolare e progressivo lungo il condotto. La perdita di carico complessiva si mantiene dell'ordine di circa 4.8 Pa, con un contributo iniziale delle perdite localizzate ormai trascurabile. Il comportamento del sistema risulta pertanto dominato dal moto interno nel canale e non più dagli effetti di ingresso.



Dal punto di vista termico, il campo di temperatura mostra una riduzione graduale lungo il condotto, ma meno intensa rispetto ai casi C7 e C8. La temperatura dell'aria passa dai 35 °C in ingresso a valori prossimi a 24–25 °C in uscita, con una variazione complessiva  $\Delta T$  dell'ordine di circa 10.5 °C. L'andamento termico appare uniforme, ma l'elevata velocità media riduce il tempo di permanenza dell'aria nel condotto, limitando l'efficacia dello scambio termico con il terreno.

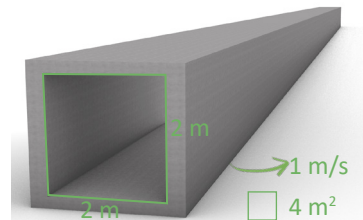


Figura 6.128 Modello baseline caso C9\_L80\_W2\_H2\_V1\_A4.

Fonte: K. Mitrik

Figura 6.129 Caso C9\_L80\_W2\_H2\_V1\_A4 - Distribuzione della velocità del flusso dell'aria (m/s) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Figura 6.130 Caso C9\_L80\_W2\_H2\_V1\_A4 - Distribuzione della pressione (Pa) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

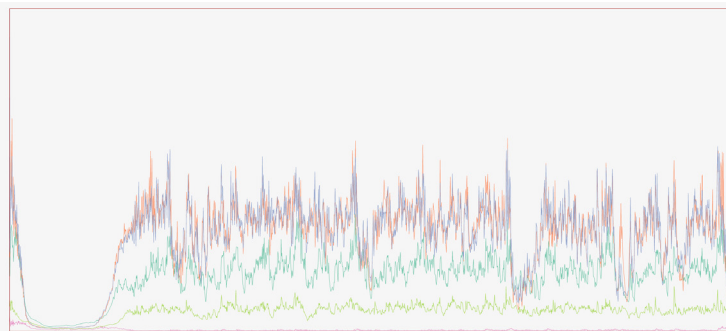
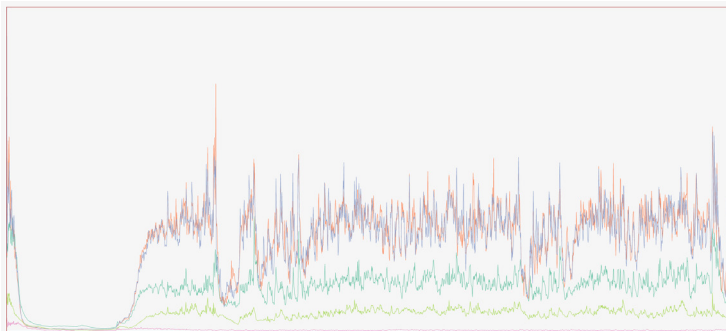
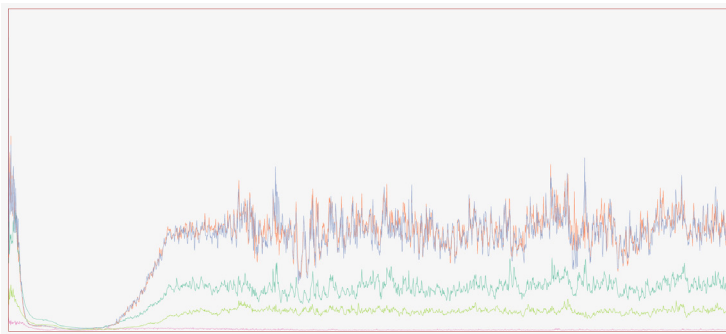
Figura 6.131 Caso C9\_L80\_W2\_H2\_V1\_A4 - Distribuzione della temperatura (°C) nel modello baseline.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

### 6.9.3 Influenza dell'apertura di ingresso sul comportamento fluidodinamico e termico lungo il condotto (casi C7-C8-C9)

Il confronto tra i casi C7, C8 e C9 (*Grafico 6.10*) consente di analizzare l'evoluzione del comportamento termo-fluidodinamico del sistema in condizioni operative più spinte, caratterizzate da un progressivo incremento dell'intensità del moto e delle interazioni interne al flusso. Il caso C7 rappresenta una configurazione relativamente stabile, nella quale, dopo una fase iniziale di transitorio, il flusso raggiunge un regime sviluppato caratterizzato da oscillazioni contenute e distribuite in modo uniforme. Le fluttuazioni, pur presenti, risultano moderate e non compromettono la continuità del moto, indicando una turbolenza diffusa ma ancora controllata. Nel caso C8 si osserva un aumento significativo della variabilità del segnale, con oscillazioni più ampie e irregolari e la comparsa di picchi locali più frequenti. Il flusso mostra una maggiore sensibilità alle perturbazioni, evidenziando episodi intermittenti di instabilità che si manifestano con riduzioni temporanee dell'intensità seguite da rapide riprese. Tale comportamento è indicativo di una struttura del moto meno coerente, in cui le perdite localizzate assumono un ruolo più rilevante e la distribuzione delle grandezze fluidodinamiche diventa meno uniforme lungo il condotto. Nel caso C9 questa tendenza si accentua ulteriormente: il regime è caratterizzato da un'elevata turbolenza, con fluttuazioni di ampiezza molto elevata e frequenza sostenuta. In queste condizioni, il comportamento del sistema risulta fortemente dinamico, con una marcata predominanza delle componenti turbolente rispetto al moto medio. Nonostante ciò, la continuità globale del flusso viene mantenuta, seppur in presenza di una significativa irregolarità temporale. Dal punto di vista delle perdite di carico, l'evoluzione da C7 a C9 evidenzia un progressivo incremento del contributo delle perdite dissipative associate alla turbolenza. Nel caso C7 le perdite risultano distribuite in modo relativamente uniforme, mentre nei casi C8 e soprattutto C9 si osserva un aumento delle perdite localizzate legate alle instabilità del flusso e alle variazioni rapide del campo di moto. Questo comportamento si traduce in una minore efficienza fluidodinamica complessiva al crescere dell'intensità operativa. Dal punto di vista termico, i tre casi mostrano un andamento complessivamente simile lungo la maggior parte del condotto, con una distribuzione della temperatura che tende a stabilizzarsi dopo il tratto iniziale. Le differenze tra i casi risultano quindi meno marcate rispetto a quelle osservate sul piano fluidodinamico, confermando che l'effetto delle condizioni operative incide in modo più

significativo sulla dinamica del flusso che non sul comportamento termico globale. Nel complesso, l'analisi evidenzia come l'incremento dell'intensità operativa porti a una progressiva transizione da un regime relativamente stabile (C7) a condizioni caratterizzate da elevata turbolenza e instabilità (C9). Il caso C8 si configura come una condizione intermedia, in cui l'aumento delle prestazioni è accompagnato da una crescita della variabilità del sistema. Tale comportamento suggerisce l'esistenza di un compromesso tra intensificazione del moto e stabilità del flusso, con implicazioni rilevanti nella scelta delle condizioni operative ottimali.



**Grafico 6.10** Confronto dei profili longitudinali di velocità dell'aria, pressione e temperatura lungo il condotto per i casi C7\_L80\_W2\_H2\_V1\_A1, C8\_L80\_W2\_H2\_V1\_A2, C9\_L80\_W2\_H2\_V1\_A4, ottenuti variando l'apertura di ingresso (Area apertura  $(1\text{m}^2 - 2\text{m}^2 - 4\text{m}^2)$ ). Fonte: K. Mitrik

**Legenda:**

- $U_x$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse X
- $U_y$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Y
- $U_z$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Z
- $p_{rgh}$  (Pa) pressione relativa corretta per l'effetto gravitazionale
- $T$  ( $^{\circ}\text{C}$  o K) temperatura del fluido
- $k$  ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) energia cinetica turbolenta



*Tabella 6.9 Fase C: Variazione dell'area delle aperture sui tre casi migliori. Studio dell'effetto dell'area di ingresso/uscita (1–4 m<sup>2</sup>) sui casi derivati dalla Fase B. I risultati evidenziano l'impatto delle aperture sulle prestazioni del sistema in termini di velocità, perdite di carico e differenza di temperatura ( $\Delta T$ ), permettendo l'individuazione dei casi più rappresentativi per le fasi successive.*  
*Fonte: K. Mitrik*

#### 6.9.4 Analisi conclusiva dell'influenza delle aperture e delle condizioni operative

La *Tabella 6.9* riporta i risultati sintetici delle simulazioni CFD relative alla Fase C, finalizzata all'analisi dell'influenza dei parametri geometrici del condotto sul comportamento del sistema TLVS. L'analisi comparativa dei nove casi simulati nella Fase C ha permesso di valutare in modo sistematico l'influenza combinata dell'area delle aperture e delle condizioni operative sul comportamento fluidodinamico e termico del sistema TLVS, mantenendo costante la configurazione geometrica del condotto selezionata nelle fasi precedenti. L'analisi è stata condotta per gruppi omogenei di condizio-

| Codice               | Caso | Caso base | Lunghezza canale (m) | Sezione (m <sup>2</sup> ) | Velocità aria in ingresso (m/s) | Area apertura (m <sup>2</sup> ) | T aria ingresso (°C) | T suolo (°C) |
|----------------------|------|-----------|----------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------|
| C1_L80_W2_H2_V0.3_A1 | C1   | B7        | 80                   | 4.0                       | 0.3                             | 1                               | 35                   | 15           |
| C2_L80_W2_H2_V0.3_A2 | C2   | B7        | 80                   | 4.0                       | 0.3                             | 2                               | 35                   | 15           |
| C3_L80_W2_H2_V0.3_A4 | C3   | B7        | 80                   | 4.0                       | 0.3                             | 4                               | 35                   | 15           |
| C4_L80_W2_H2_V0.5_A1 | C4   | B8        | 80                   | 4.0                       | 0.5                             | 1                               | 35                   | 15           |
| C5_L80_W2_H2_V0.5_A2 | C5   | B8        | 80                   | 4.0                       | 0.5                             | 2                               | 35                   | 15           |
| C6_L80_W2_H2_V0.5_A4 | C6   | B8        | 80                   | 4.0                       | 0.5                             | 4                               | 35                   | 15           |
| C7_L80_W2_H2_V1_A1   | C7   | B9        | 80                   | 4.0                       | 1.0                             | 1                               | 35                   | 15           |
| C8_L80_W2_H2_V1_A2   | C8   | B9        | 80                   | 4.0                       | 1.0                             | 2                               | 35                   | 15           |
| C9_L80_W2_H2_V1_A4   | C9   | B9        | 80                   | 4.0                       | 1.0                             | 4                               | 35                   | 15           |

| Codice               | Velocità media (m/s) | Velocità outlet (m/s) | Pressione inlet (Pa) | Pressione outlet (Pa) | $\Delta P$ perdita carico (Pa) | T media (°C) | T outlet (°C) | $\Delta T$ (°C) |
|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------|---------------|-----------------|
| C1_L80_W2_H2_V0.3_A1 | 0.75                 | 2.1                   | 5.1                  | 0.45                  | 4.65                           | 26.0         | 19.5          | 15.5            |
| C2_L80_W2_H2_V0.3_A2 | 0.90                 | 4.8                   | 5.1                  | 0.50                  | 4.60                           | 25.5         | 22.5          | 12.5            |
| C3_L80_W2_H2_V0.3_A4 | 0.95                 | 4.8                   | 5.1                  | 0.70                  | 4.40                           | 26.5         | 23.5          | 11.5            |
| C4_L80_W2_H2_V0.5_A1 | 0.95                 | 4.8                   | 5.1                  | 0.70                  | 0.70                           | 26.5         | 23.5          | 11.5            |
| C5_L80_W2_H2_V0.5_A2 | 1.35                 | 4.8                   | 5.1                  | 0.70                  | 0.70                           | 26.5         | 23.5          | 11.5            |
| C6_L80_W2_H2_V0.5_A4 | 1.75                 | 4.9                   | 5.3                  | 0.80                  | 0.80                           | 27.5         | 24.5          | 10.5            |
| C7_L80_W2_H2_V1_A1   | 1.90                 | 4.8                   | 5.1                  | 0.60                  | 4.50                           | 26.5         | 23.5          | 11.5            |
| C8_L80_W2_H2_V1_A2   | 2.25                 | 4.8                   | 5.2                  | 0.60                  | 5.00                           | 26.5         | 23.5          | 11.5            |
| C9_L80_W2_H2_V1_A4   | 2.50                 | 4.9                   | 5.3                  | 0.50                  | 5.20                           | 27.5         | 24.5          | 10.5            |

ni operative, al fine di isolare l'effetto delle variazioni di apertura e garantire la confrontabilità dei risultati.

Nel primo gruppo di casi (C1, C2, C3), caratterizzato da velocità dell'aria pari a 0.3 m/s, si osserva che l'aumento dell'area delle aperture comporta una significativa riduzione delle perdite localizzate e una maggiore uniformità del flusso. Il caso C1 evidenzia una marcata discontinuità nella zona iniziale e una maggiore incidenza delle perdite, mentre nei casi C2 e C3 il campo di moto risulta progressivamente più regolare. Dal punto di vista termico, si osserva una lieve riduzione del salto termico all'aumentare dell'area, passando da circa 15.5 °C nel caso C1 a circa 12–12.5 °C nei casi C2 e C3. Nel secondo gruppo (C4, C5, C6), con velocità pari a 0.5 m/s, il comportamento del sistema risulta più dinamico. L'aumento dell'area delle aperture continua a migliorare la regolarità del flusso, ma l'incremento della velocità introduce una maggiore variabilità e un aumento delle fluttuazioni. Il caso C4 mostra ancora un'influenza significativa delle perdite localizzate, mentre nei casi C5 e C6 il flusso risulta più uniforme. Dal punto di vista termico, si osserva una riduzione del raffrescamento, con valori di  $\Delta T$  compresi tra circa 11.5 °C e 10–10.5 °C, confermando l'effetto negativo dell'aumento della velocità sullo scambio termico.

Nel terzo gruppo (C7, C8, C9), caratterizzato da velocità pari a 1 m/s, il sistema entra in un regime fortemente turbolento. Le oscillazioni del flusso risultano molto marcate e la distribuzione delle grandezze fluidodinamiche diventa meno uniforme. Il caso C7 mantiene ancora un comportamento relativamente controllato, mentre nei casi C8 e C9 si osserva una crescita significativa delle instabilità e delle perdite dissipative. Dal punto di vista termico, i valori di  $\Delta T$  risultano simili a quelli del gruppo precedente, evidenziando una limitata influenza dell'ulteriore incremento della velocità sulle prestazioni termiche.

Dall'analisi complessiva emerge quindi un comportamento sistematico: l'aumento dell'area delle aperture migliora il comportamento fluidodinamico riducendo le perdite localizzate e favorendo una maggiore uniformità del flusso, mentre l'aumento della velocità dell'aria comporta una crescita delle perdite dissipative e una riduzione dell'efficacia dello scambio termico. Il sistema passa progressivamente da condizioni penalizzate da restrizioni geometriche (C1) a configurazioni caratterizzate da elevata turbolenza e instabilità (C9), evidenziando la presenza di un intervallo ottimale di funzionamento.

Tra tutte le configurazioni analizzate, emergono come soluzioni più significative i casi:

C1 (80 m, 2×2 m,  $V = 0.3$  m/s,  $A = 1$  m<sup>2</sup>) → massimo raffrescamento;  
C2 (80 m, 2×2 m,  $V = 0.3$  m/s,  $A = 2$  m<sup>2</sup>) → miglior compromesso tra  
raffrescamento e perdite di carico;  
C9 (80 m, 2×2 m,  $V = 1$  m/s,  $A = 4$  m<sup>2</sup>) → configurazione a maggiore  
capacità di trasporto e sviluppo del flusso.

Questi tre casi rappresentano le configurazioni più rilevanti per la fase successiva, in quanto consentono di analizzare il sistema in condizioni operative differenti, coprendo un ampio spettro di prestazioni. In particolare, C1 consente di valutare il comportamento del sistema in condizioni di massimo scambio termico, C2 rappresenta la soluzione più equilibrata dal punto di vista progettuale, mentre C9 consente di analizzare il sistema in condizioni operative più spinte, caratterizzate da elevata turbolenza e capacità di trasporto. Sulla base di tali considerazioni, la fase successiva sarà dedicata all'applicazione della configurazione ottimizzata alla geometria reale del sistema TLVS, con l'obiettivo di verificare il comportamento del sistema in condizioni più rappresentative e individuare la soluzione progettuale finale.

## 6.10 Simulazioni CFD del sistema TLVS a configurazione labirintica

L'analisi condotta nelle fasi precedenti ha permesso di definire in modo sistematico il comportamento termo-fluidodinamico del sistema TLVS in configurazione rettilinea, attraverso l'ottimizzazione progressiva dei parametri geometrici e operativi. In particolare, la Fase A ha individuato le dimensioni più efficaci del condotto, la Fase B ha evidenziato l'influenza della velocità dell'aria sul bilancio tra perdite di carico ed efficacia dello scambio termico, mentre la Fase C ha analizzato il ruolo delle condizioni al contorno, con riferimento all'area delle aperture. Dall'analisi comparativa sono emerse tre configurazioni rappresentative: il caso C1, caratterizzato da massima efficacia termica, il caso C2, identificato come miglior compromesso tra prestazioni termiche e comportamento fluidodinamico, e il caso C9, associato a condizioni operative più spinte e maggiore capacità di trasporto del flusso, ma con perdite di carico più elevate. Al fine di garantire coerenza metodologica e chiarezza interpretativa nelle fasi successive, è stato selezionato come caso di riferimento il C2, in quanto rappresentativo del miglior equilibrio tra efficacia dello scambio termico e contenimento delle perdite di carico, e quindi più idoneo a descrivere condizioni operative realistiche del sistema. L'adozione di un unico caso di riferimento consente di ridurre la complessità dell'analisi e di isolare in modo più rigoroso l'influenza dei parametri geometrici introdotti nella configurazione labirintica, evitando sovrapposizioni interpretative dovute alla variazione simultanea delle condizioni operative. Tale scelta permette inoltre di mantenere la confrontabilità dei risultati e di evidenziare in maniera più chiara le relazioni causa-effetto tra geometria del condotto e comportamento termo-fluidodinamico del sistema. Nonostante l'efficacia della configurazione rettilinea ottimizzata, essa rappresenta una schematizzazione semplificata del sistema reale. In applicazioni progettuali avanzate, infatti, il TLVS è frequentemente realizzato mediante configurazioni a sviluppo labirintico, finalizzate ad aumentare il percorso effettivo dell'aria e la superficie di scambio termico, mantenendo al contempo contenuti gli ingombri geometrici. L'introduzione di una geometria a labirinto compor-

ta tuttavia una significativa modifica del campo di moto, con effetti rilevanti in termini di distribuzione delle velocità, insorgenza di fenomeni di ricircolo e incremento delle perdite di carico. Alla luce di tali considerazioni, la fase successiva dell'analisi è dedicata allo studio del sistema TLVS in configurazione labirintica, assumendo come base il caso di riferimento selezionato nella Fase C. L'obiettivo è quello di valutare in modo sistematico l'influenza della geometria interna del condotto sul comportamento termo-fluidodinamico complessivo, individuando configurazioni in grado di migliorare le prestazioni termiche senza introdurre penalizzazioni eccessive dal punto di vista fluidodinamico. L'analisi è stata strutturata secondo una nuova matrice di simulazione articolata in più fasi successive. In una prima fase (Fase D) viene introdotta la configurazione labirintica di base, mantenendo costanti i parametri principali derivati dal caso C2, al fine di valutare l'effetto globale della modifica geometrica rispetto al condotto rettilineo. Nelle fasi successive, l'attenzione viene focalizzata sui principali parametri geometrici caratterizzanti il labirinto: nella Fase E viene analizzata l'influenza dello spessore delle pareti interne, mentre nella Fase F viene studiata la distanza tra i setti, ovvero la larghezza dei canali di flusso (*Tabella 6.10*). Tale impostazione consente di isolare in modo progressivo gli effetti dei singoli parametri, mantenendo la coerenza metodologica con le fasi precedenti e garantendo la confrontabilità dei risultati. L'analisi congiunta dei campi di velocità, pressione e temperatura permetterà di individuare le configurazioni più efficaci in termini di incremento dello scambio termico e gestione delle perdite di carico, definendo così le basi per una progettazione avanzata del sistema TLVS in configurazione reale.

*Tabella 6.10* Struttura della fase avanzata. Fonte: K. Mitrik

| Fase | Obiettivo                                | Parametro variabile              | Parametri mantenuti costanti                                      | Casi di partenza | Output principali                | Esito atteso                                       | Note                                                         |
|------|------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| D    | Introduzione della geometria labirintica | Geometria in pianta del percorso | t costante; s costante; condizioni termo-fluidodinamiche costanti | C2               | U, p, $\Delta P$ , T, $\Delta T$ | Selezione della miglior configurazione labirintica | Confronto con riferimento rettilineo                         |
| E    | Variazione dello spessore dei setti      | t = 0.10 / 0.20 / 0.30 m         | Geometria migliore della Fase D; s costante                       | D_migliore       | U, p, $\Delta P$ , T, $\Delta T$ | Individuazione del t ottimale                      | Analisi dell'effetto sulla conduzione e sulle perdite        |
| F    | Variazione della distanza tra setti      | s = 1.0 / 2.0 / 3.0 m            | Geometria migliore della Fase D; t migliore della Fase E          | E_migliore       | U, p, $\Delta P$ , T, $\Delta T$ | Individuazione del s ottimale                      | Analisi dell'effetto sul tempo di permanenza e sui ricircoli |

### 6.10.1 Fase D – Introduzione della configurazione labirintica di base

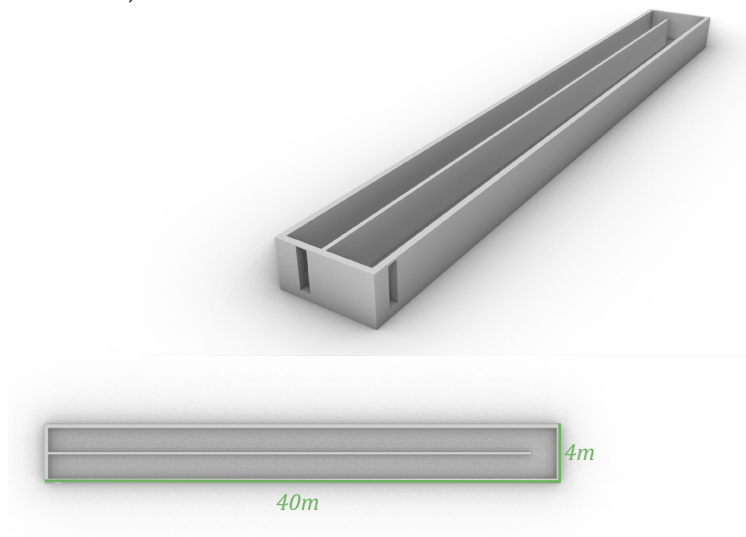
In continuità con l'impostazione metodologica definita, la Fase D è finalizzata a valutare l'effetto della sola modifica della configurazione planimetrica del condotto, passando da uno sviluppo rettilineo a una configurazione labirintica.

L'analisi viene condotta assumendo come base il miglior caso rappresentativo individuato nella Fase C (C2), mantenendo invariati tutti i parametri geometrici e operativi precedentemente ottimizzati. In particolare, lo spessore delle pareti interne e la distanza tra i setti sono mantenuti costanti, al fine di isolare l'influenza della sola geometria del percorso sul comportamento termo-fluidodinamico del sistema. Per garantire la confrontabilità dei risultati, tutte le configurazioni considerate sono caratterizzate da:

- lunghezza equivalente del percorso pari a 80 m, coerente con il caso ottimizzato della fase preliminare;
- superficie in pianta costante pari a  $160 \text{ m}^2$ , al fine di mantenere invariati gli ingombri complessivi del sistema.

Escludendo il caso rettilineo di riferimento, già analizzato nelle fasi precedenti, vengono definite tre configurazioni labirintiche equivalenti, ottenute variando il rapporto tra lunghezza e larghezza in pianta:

- configurazione  $40 \times 4$  m, caratterizzata da una compattezza moderata;



*Figura 6.132 Configurazione labirintica del sistema TLVS relativa al caso D\_C1\_40x4, derivata dal caso base C1, caratterizzata da sviluppo planimetrico  $40 \times 4$  m e percorso del flusso multi-direzionale. Lunghezza equivalente pari a 80 m e superficie in pianta costante ( $160 \text{ m}^2$ ).*

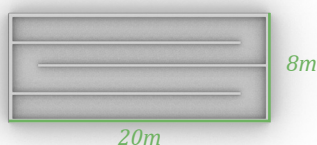
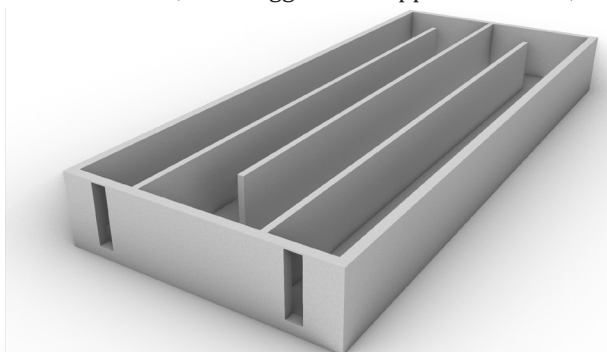
*Fonte: K. Mitrik*



**Figura 6.133** Configurazione labirintica del sistema TLVS relativa al caso D\_C1\_20x8, derivata dal caso base C1, con sviluppo planimetrico 20x8 m e maggiore compattezza geometrica, che comporta un percorso del flusso più articolato. Lunghezza equivalente pari a 80 m e superficie in pianta costante (160 m<sup>2</sup>).

Fonte: K. Mitrik

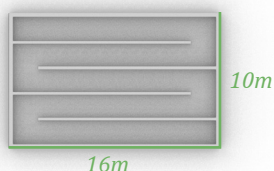
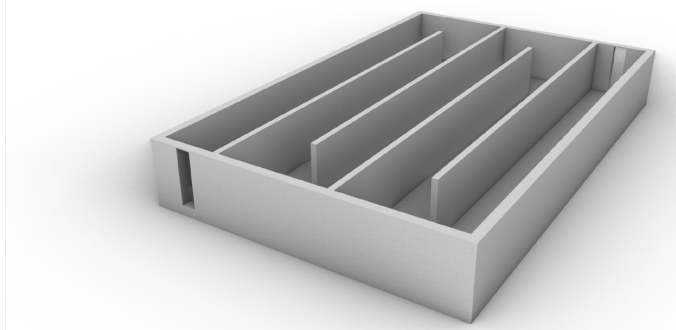
- configurazione 20x8 m, con maggiore sviluppo trasversale;



- configurazione 16x10 m, rappresentativa di una configurazione fortemente compatta.

**Figura 6.134** Configurazione labirintica del sistema TLVS relativa al caso D\_C2\_16x10, derivata dal caso base C2, caratterizzata da sviluppo planimetrico 16x10 m e elevata compattezza geometrica, con percorso del flusso fortemente articolato. Lunghezza equivalente pari a 80 m e superficie in pianta costante (160 m<sup>2</sup>).

Fonte: K. Mitrik



Tali configurazioni consentono di analizzare in modo sistematico l'effetto della crescente compattezza planimetrica sul campo di moto e sui fenomeni di scambio termico. In particolare, l'introduzione di un percorso labirintico determina una configurazione del flusso di tipo multi-direzionale, caratterizzata da ripetuti cambi di

direzione, con conseguente incremento delle perdite di carico e possibile insorgenza di zone di ricircolo. L'obiettivo della fase è quindi valutare il contributo della geometria labirintica in termini di incremento dello scambio termico e, al contempo, quantificare le penalizzazioni fluidodinamiche associate, in termini di perdite di carico e distribuzione delle velocità.

I risultati ottenuti saranno confrontati tra le diverse configurazioni e per ciascun caso base (C1, C2 e C9), al fine di individuare le soluzioni più efficaci nel bilanciare le prestazioni termiche e fluidodinamiche, in coerenza con il principio guida dell'intera analisi.

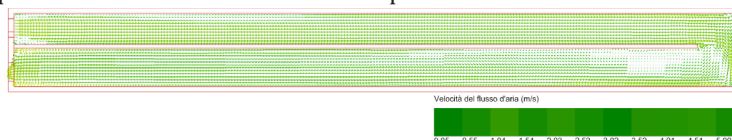
*Tabella 6.11 Schema dei casi analizzati nella Fase D per lo studio dell'influenza della configurazione labirintica sul comportamento termo-fluidodinamico del sistema TLVS, a partire dai casi rappresentativi C1, C2 e C9. Fonte: rielaborazione della dottoranda K. Mitrik*

| Codice  | Caso base | Configurazione geometrica | Tipologia del condotto | Lunghezza equivalente del percorso (m) | Lunghezza in pianta (m) | Larghezza in pianta (m) | Superficie in pianta (m <sup>2</sup> ) | Spessore dei setti (m) | Interasse tra i setti (m) | Numero di setti (-) |
|---------|-----------|---------------------------|------------------------|----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|
| D_C2_L1 | C2        | 40×4                      | Labirintico            | 80                                     | 40                      | 4                       | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 1                   |
| D_C2_L2 | C2        | 20×8                      | Labirintico            | 80                                     | 20                      | 8                       | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 3                   |
| D_C2_L3 | C2        | 16×10                     | Labirintico            | 80                                     | 16                      | 10                      | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 4                   |

### Caso D\_C2\_L1

Il caso D\_C2\_L1 rappresenta una configurazione labirintica derivata dal caso base C2, caratterizzata da sviluppo planimetrico pari a 40×4 m, con lunghezza equivalente del percorso pari a 80 m e presenza di setti interni che inducono un flusso multi-direzionale. Le condizioni operative sono quelle ottimizzate del caso C2, con velocità dell'aria in ingresso pari a 0.3 m/s e temperatura di ingresso pari a 35 °C.

Il campo di velocità evidenzia una distribuzione complessivamente regolare lungo i tratti rettilinei del condotto, con valori medi dell'ordine di circa 1.3–1.5 m/s, coerenti con la sezione di passaggio. Tuttavia, in corrispondenza dei cambi di direzione imposti dai setti, si osservano variazioni locali significative del campo di moto. In queste regioni si manifestano zone a bassa velocità e deviazioni delle linee di corrente, associate a fenomeni di separazione del flusso. In uscita, la velocità raggiunge valori prossimi a 4.8–5.0 m/s, analogamente al caso rettilineo, ma con una distribuzione meno uniforme e caratterizzata da maggiore dispersione locale. La presenza della geometria labirintica introduce quindi disomogeneità del campo di velocità, pur mantenendo valori medi comparabili al caso di riferimento.



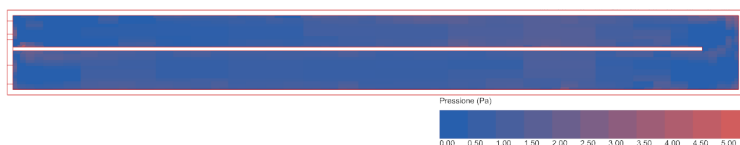
*Figura 6.135 Campo di velocità del flusso d'aria relativo al caso D\_C2\_L1, rappresentativo della configurazione labirintica con sviluppo planimetrico 40×4 m.*

*Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).*

Dal punto di vista della pressione, il comportamento risulta influenzato in modo significativo dalle perdite localizzate introdotte dalla geometria. La perdita di carico complessiva si attesta su valori dell'ordine di circa 4.6–4.8 Pa, in linea ma leggermente superiore rispetto al caso rettilineo C2. La distribuzione della pressione non risulta lineare: si osservano infatti gradienti più marcati in corrispondenza dei cambi di direzione, dove si concentrano le principali dissipazioni energetiche. Lungo i tratti rettilinei intermedi, invece, la pressione decresce in modo più graduale, indicando una combinazione tra perdite distribuite e contributi localizzati. Questo comportamento evidenzia come la geometria labirintica introduca un incremento delle perdite principalmente legato alle discontinuità del flusso.

**Figura 6.136** Distribuzione della pressione relativa al caso D\_C2\_L1. Il campo mostra una caduta non uniforme lungo il percorso, con gradienti più marcati nelle zone di deviazione del flusso, indicativi di perdite localizzate.

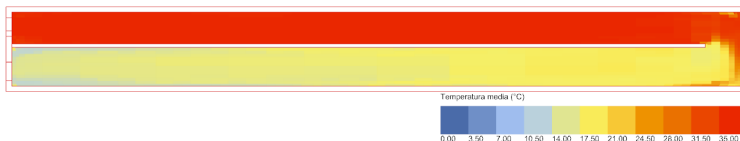
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Il campo di temperatura mostra un raffreddamento progressivo lungo l'intero sviluppo del condotto, con una riduzione della temperatura dell'aria da 35 °C in ingresso a valori prossimi a 23–24 °C in uscita, corrispondente a una variazione complessiva  $\Delta T$  dell'ordine di circa 11–12 °C. Rispetto al caso rettilineo, il raffreddamento risulta distribuito in maniera più uniforme lungo il percorso, grazie all'aumento del tempo di permanenza dell'aria. Tuttavia, nelle zone caratterizzate da basse velocità e ricircoli, l'efficacia dello scambio convettivo risulta localmente ridotta, determinando una leggera disomogeneità del campo termico.

**Figura 6.137** Campo di temperatura dell'aria relativo al caso D\_C2\_L1. La distribuzione evidenzia un raffreddamento progressivo lungo il condotto, con andamento generalmente uniforme e leggera disomogeneità nelle regioni caratterizzate da ricircoli.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

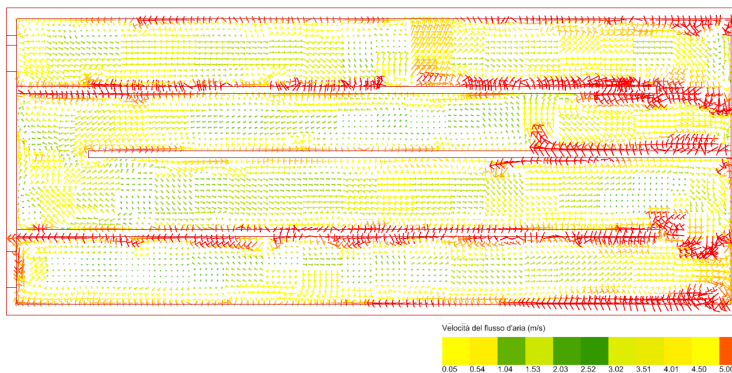


La configurazione D\_C2\_L1 evidenzia come l'introduzione del labirinto consenta una redistribuzione dello scambio termico lungo il condotto, senza un incremento significativo del  $\Delta T$  rispetto al caso di riferimento, ma a fronte di un aumento delle perdite di carico legato ai cambi di direzione del flusso. Tale comportamento conferma come, in questa configurazione, il beneficio termico sia limitato, mentre l'impatto fluidodinamico risulti più marcato, evidenziando la necessità di un'ulteriore ottimizzazione geometrica nelle fasi successive.

### Caso D\_C2\_L2

Il caso D\_C2\_L2 rappresenta una configurazione labirintica derivata dal caso base C2, caratterizzata da uno sviluppo planimetrico pari a 20×8 m, con maggiore compattezza rispetto al caso D\_C2\_L1 e conseguente aumento della frequenza dei cambi di direzione del flusso. Le condizioni operative restano invariate, con velocità dell'aria in ingresso pari a 0.5 m/s e temperatura iniziale pari a 35 °C.

Il campo di velocità evidenzia una distribuzione significativamente più perturbata rispetto al caso D\_C2\_L1. Nei tratti rettilinei si osservano valori medi dell'ordine di 1.5–2.0 m/s, leggermente superiori rispetto alla configurazione meno compatta, a causa della riduzione della lunghezza dei singoli tratti e della maggiore interazione tra i getti nelle zone di deviazione. In corrispondenza dei cambi di direzione, il flusso subisce accelerazioni locali più marcate, con valori che raggiungono nuovamente 4.5–5.0 m/s, ma con una distribuzione meno uniforme e caratterizzata da forti gradienti trasversali. Rispetto al caso D\_C2\_L1, risultano più estese le zone a bassa velocità e i nuclei di ricircolo, in particolare nelle regioni di uscita dai setti e negli angoli di inversione del flusso. Ciò evidenzia una maggiore instabilità del campo di moto, dovuta alla maggiore compattezza geometrica.



*Figura 6.138 Campo di velocità del flusso d'aria relativo al caso D\_C2\_L2, rappresentativo della configurazione labirintica con sviluppo planimetrico 20×8 m.*

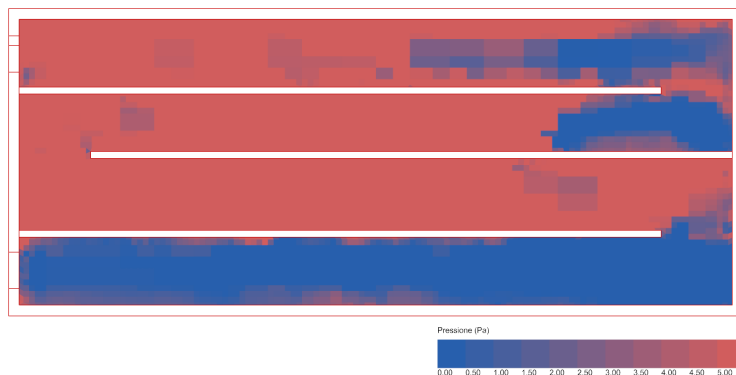
*Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).*

Dal punto di vista della pressione, il comportamento risulta ulteriormente penalizzato. La perdita di carico complessiva si colloca su valori dell'ordine di circa 4.8–5.0 Pa, mostrando un incremento rispetto al caso D\_C2\_L1. La distribuzione della pressione è fortemente non lineare, con gradienti elevati concentrati in corrispondenza dei cambi di direzione, dove si localizzano le principali dissipazioni energetiche. Rispetto alla configurazione 40×4, l'aumento della frequenza delle deviazioni del flusso comporta una maggiore incidenza delle perdite localizzate rispetto a quelle di-

**Figura 6.x139** Distribuzione della pressione relativa al caso D\_C2\_L2. Il campo mostra una caduta non uniforme lungo il percorso, con gradienti più marcati nelle zone di deviazione del flusso, indicativi di perdite localizzate.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

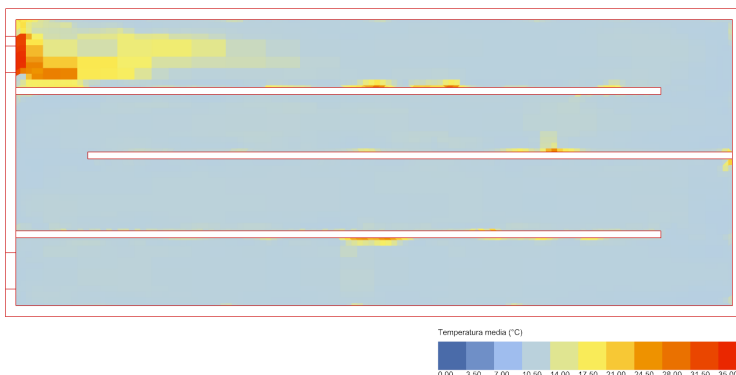
tribuite, rendendo il comportamento complessivo più dissipativo.



Il campo di temperatura evidenzia un raffreddamento complessivamente più diffuso lungo il percorso rispetto al caso D\_C2\_L1. La temperatura dell'aria si riduce da 35 °C in ingresso a valori prossimi a 22–23 °C in uscita, con una variazione complessiva  $\Delta T$  dell'ordine di circa 12–13 °C, leggermente superiore rispetto alla configurazione meno compatta. Questo risultato è attribuibile all'aumento del tempo di permanenza e alla maggiore interazione tra flusso e superfici solide. Tuttavia, la distribuzione termica non risulta uniforme: le zone di ricircolo e bassa velocità mostrano un raffreddamento meno efficace, evidenziando una riduzione locale del coefficiente di scambio convettivo.

**Figura 6.140** Campo di temperatura dell'aria relativo al caso D\_C2\_L2. La distribuzione evidenzia un raffreddamento progressivo lungo il condotto, con andamento generalmente uniforme e leggera disomogeneità nelle regioni caratterizzate da ricircoli.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

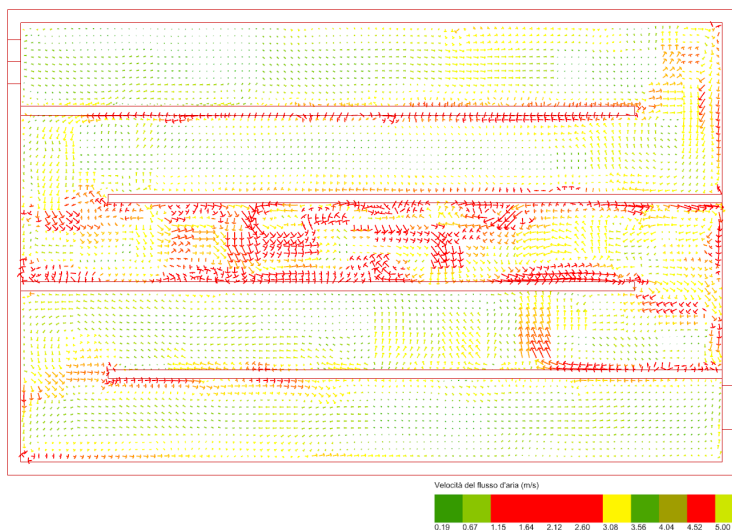


La configurazione D\_C2\_L2 evidenzia un miglioramento dell'efficacia termica globale rispetto al caso D\_C2\_L1, a fronte però di un incremento più marcato delle perdite di carico e di una maggiore complessità del campo fluidodinamico. L'aumento della compattezza geometrica amplifica gli effetti dei cambi di direzione, accentuando il contributo delle perdite localizzate e rendendo il sistema più dissipativo.

### Caso D\_C2\_L3

Il caso D\_C2\_L3 rappresenta la configurazione labirintica a massima compattezza derivata dal caso base C2, caratterizzata da uno sviluppo planimetrico pari a  $16 \times 10$  m. Rispetto ai casi precedenti, la riduzione della lunghezza dei singoli tratti e l'aumento della frequenza dei cambi di direzione determinano una configurazione fortemente articolata, in cui il flusso è sottoposto a deviazioni ripetute e ravvicinate. Le condizioni operative restano invariate, con velocità dell'aria in ingresso pari a 0.3 m/s e temperatura iniziale pari a 35 °C.

Il campo di velocità evidenzia una distribuzione fortemente disomogenea, con un'evidente frammentazione del campo di moto. Nei tratti rettilinei, i valori medi risultano generalmente compresi tra 1.5 e 2.5 m/s, ma con una maggiore variabilità rispetto ai casi meno compatti. In corrispondenza dei cambi di direzione, si osservano accelerazioni locali più intense, con velocità che raggiungono valori prossimi a 4.5–5.0 m/s, associate a getti concentrati e deviazioni marcate delle linee di flusso.



*Figura 6.141 Campo di velocità del flusso d'aria relativo al caso D\_C2\_L2, rappresentativo della configurazione labirintica con sviluppo planimetrico  $20 \times 8$  m.*

*Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).*

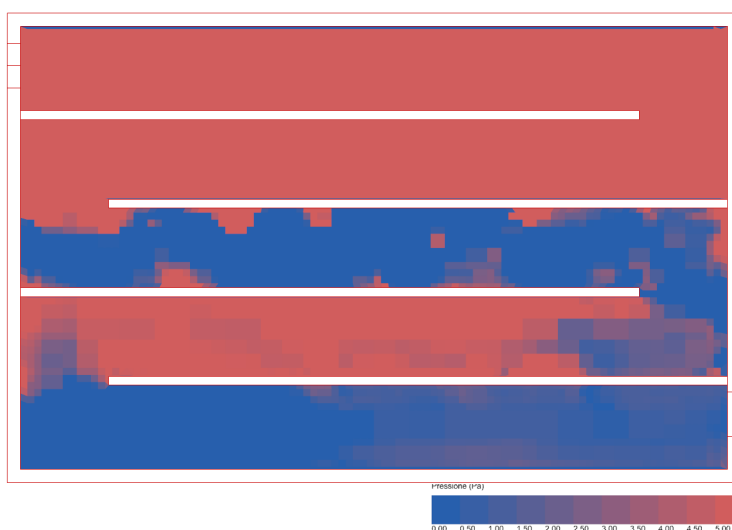
Dal punto di vista della pressione, la configurazione mostra un ulteriore incremento delle perdite di carico, con valori complessivi dell'ordine di circa 5.0–5.2 Pa. La distribuzione risulta altamente non lineare, con gradienti di pressione molto accentuati e localizzati in corrispondenza di ciascun cambio di direzione. Rispetto ai casi D\_C2\_L1 e D\_C2\_L2, si osserva una netta prevalenza delle perdite localizzate rispetto a quelle distribuite, a con-



ferma del ruolo dominante delle discontinuità geometriche. L'elevata frequenza delle deviazioni del flusso comporta infatti una dissipazione energetica diffusa lungo tutto il condotto, rendendo il comportamento complessivo significativamente più dissipativo.

*Figura 6.142 Distribuzione della pressione relativa al caso D\_C2\_L2. Il campo mostra una caduta non uniforme lungo il percorso, con gradienti più marcati nelle zone di deviazione del flusso, indicativi di perdite localizzate.*

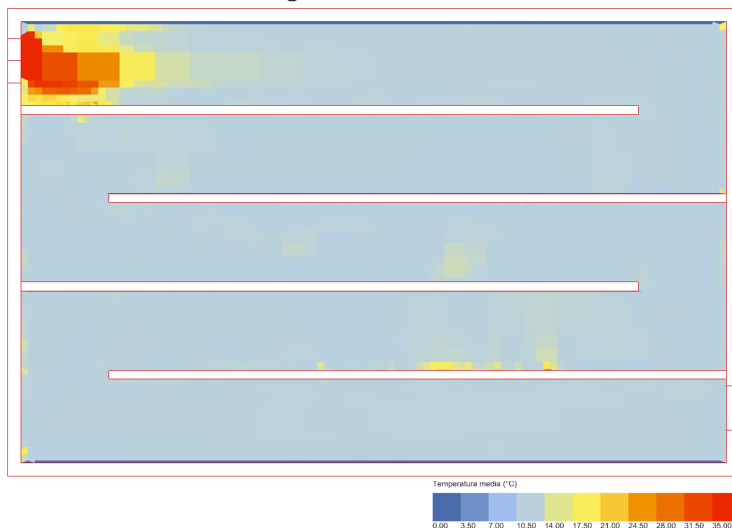
Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



Il campo di temperatura evidenzia un raffreddamento dell'aria da 35 °C in ingresso a valori prossimi a 21–22 °C in uscita, con una variazione complessiva  $\Delta T$  dell'ordine di circa 13–14 °C, superiore rispetto alle configurazioni meno compatte. L'aumento del tempo di permanenza e la maggiore interazione con le superfici favoriscono infatti lo scambio termico globale.

*Figura 6.143 Campo di temperatura dell'aria relativo al caso D\_C2\_L2. La distribuzione evidenzia un raffreddamento progressivo lungo il condotto, con andamento generalmente uniforme e leggera disomogeneità nelle regioni caratterizzate da ricircoli.*

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).



La configurazione D\_C2\_L3 evidenzia un ulteriore incremento dell'efficacia termica rispetto ai casi D\_C2\_L1 e D\_C2\_L2, a fronte però di un aumento significativo delle perdite di carico e di una marcata complessità del campo fluidodinamico. L'elevata compattezza geometrica amplifica gli effetti dei cambi di direzione, rendendo il sistema fortemente dissipativo e caratterizzato da un regime di moto instabile. Tale configurazione rappresenta quindi una condizione limite, in cui il beneficio termico massimo è ottenuto al costo di una penalizzazione fluidodinamica rilevante, evidenziando in modo chiaro il trade-off tra incremento dello scambio termico e aumento delle perdite di carico che governa il comportamento del sistema TLVS.

6.10.1.1 Analisi comparativa dell'andamento longitudinale delle grandezze termo-fluidodinamiche nella configurazione labirintica (casi D\_C2\_L1, D\_C2\_L2 e D\_C2\_L3)

Il confronto tra i casi D\_C2\_L1, D\_C2\_L2 e D\_C2\_L3 consente di analizzare l'evoluzione del comportamento del sistema TLVS al variare della compattezza geometrica della configurazione labirintica. I grafici rappresentano l'andamento delle grandezze lungo il percorso del flusso, evidenziando sia il regime medio sia le fluttuazioni indotte dai cambi di direzione.

Nel caso D\_C2\_L1 (40×4), il sistema mostra un comportamento relativamente stabile: dopo una fase iniziale con oscillazioni dell'ordine di 3–4, si osserva una rapida attenuazione delle fluttuazioni, con valori che si stabilizzano su livelli inferiori a 1.0–1.5. Il flusso riesce quindi a riorganizzarsi lungo il condotto, limitando la propagazione delle perturbazioni.

Nel caso D\_C2\_L2 (20×8), la variabilità aumenta sensibilmente. Le oscillazioni risultano più persistenti e si estendono su una porzione maggiore del dominio, con valori residui dell'ordine di 1.5–2.0 anche nei tratti centrali. Il flusso appare meno coerente e più influenzato dalle discontinuità geometriche.

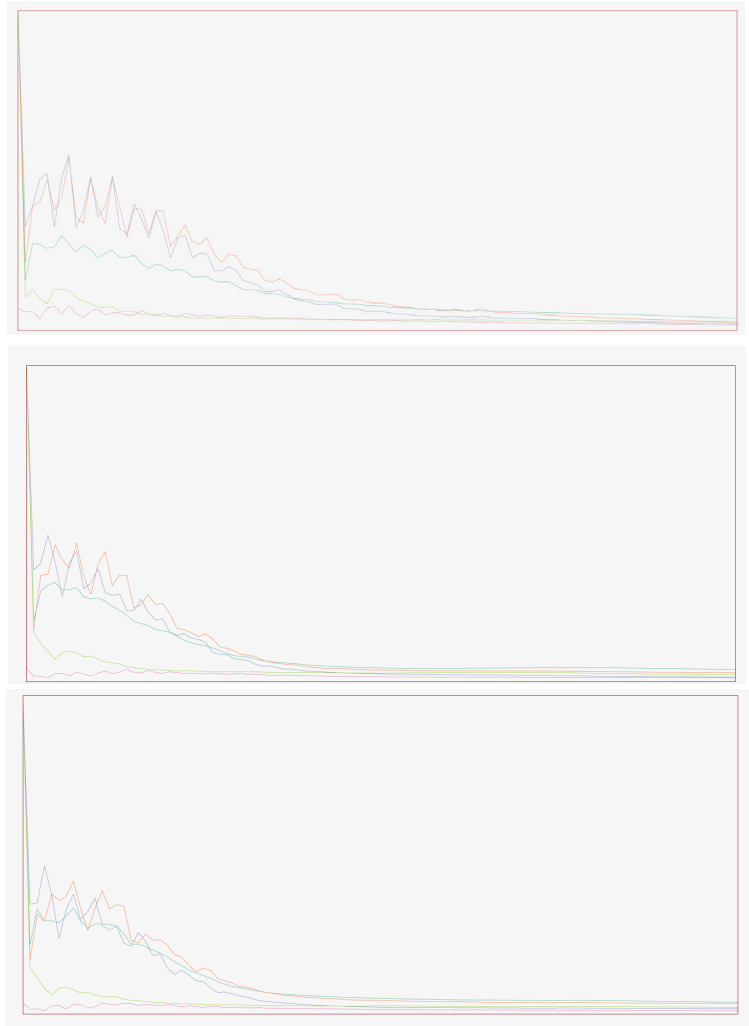
Nel caso D\_C2\_L3 (10×16), il comportamento diventa fortemente instabile. Le fluttuazioni, inizialmente elevate, si mantengono lungo gran parte del percorso, con valori superiori a 2.0 anche nelle regioni centrali. Il flusso non riesce a ristabilirsi tra i cambi di direzione, evidenziando una condizione di perturbazione quasi continua.

Nel complesso, l'aumento della compattezza geometrica determina una progressiva transizione da un regime relativamente stabile (D\_C2\_L1) a condizioni caratterizzate da elevata variabilità e instabilità (D\_C2\_L3). Tale andamento evidenzia un incremento delle perdite localizzate e della complessità del campo fluidodinamico, a fronte di

benefici termici più limitati, confermando il ruolo centrale del compromesso tra stabilità del flusso ed efficacia dello scambio termico nel sistema TLVS.

*Grafico 6.4 Andamento lungo il percorso del flusso delle grandezze termo-fluidodinamiche per i casi D\_C2\_L1, D\_C2\_L2 e D\_C2\_L3. Il grafico evidenzia una fase iniziale caratterizzata da oscillazioni marcate, seguita da una progressiva attenuazione e stabilizzazione dei valori lungo il condotto. Fonte: K. Mitrik*

- Legenda:**
- $U_x$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse X
  - $U_y$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Y
  - $U_z$  (m/s) comp. della velocità lungo l'asse Z
  - $p_{rgh}$  (Pa) pressione relativa corretta per l'effetto gravitazionale
  - $T$  (°C o K) temperatura del fluido
  - $k$  (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) energia cinetica turbolenta



6.10.1.2 Analisi dei risultati termo-fluidodinamici delle configurazioni labirintiche (Fase D)

L'analisi dei risultati riportati in tabella consente di valutare in modo diretto l'influenza della configurazione labirintica sulla risposta termo-fluidodinamica del sistema TLVS al variare della compattezza geometrica.

Dal punto di vista fluidodinamico, si osserva un incremento progressivo della velocità media, che passa da 1.4 m/s nel caso D\_C2\_L1 a 2.0 m/s nel caso D\_C2\_L3. Tale andamento è riconducibile alla maggiore interazione tra i getti e alla riduzione dell'efficacia dei tratti rettilinei nel ristabilire un flusso sviluppato. Parallelamente, la velocità in uscita rimane pressoché costante, con valori compresi tra 4.7 e 4.9 m/s, indicando che la configurazione labirintica non altera significativamente la portata complessiva del sistema, ma ne modifica la distribuzione interna. L'effetto più evidente riguarda le perdite di carico, che mostrano un incremento monotono passando da 4.6 Pa (D\_C2\_L1) a 5.1 Pa (D\_C2\_L3). Questo comportamento evidenzia come l'aumento della compattezza, e quindi della frequenza dei cambi di direzione, determini una crescita del contributo delle perdite localizzate, che diventano progressivamente predominanti rispetto a quelle distribuite. Ne deriva una riduzione dell'efficienza fluidodinamica complessiva del sistema al crescere della complessità geometrica. Dal punto di vista termico, si osserva invece un miglioramento delle prestazioni. La temperatura media dell'aria si riduce da 28.5 °C a 27.0 °C, mentre la temperatura in uscita passa da 23.5 °C a 21.8 °C, con un incremento della variazione termica complessiva  $\Delta T$  da 11.5 °C a 13.2 °C. Questo risultato è attribuibile all'aumento del tempo di permanenza e alla maggiore superficie effettiva di scambio, che favoriscono il raffreddamento dell'aria lungo il percorso. Tuttavia, il miglioramento termico risulta relativamente contenuto rispetto all'incremento delle perdite di carico. In particolare, il passaggio da D\_C2\_L2 a D\_C2\_L3 comporta un aumento di  $\Delta T$  di circa 1 °C, a fronte di un incremento delle perdite pari a 0.3 Pa, evidenziando una riduzione del beneficio marginale in termini di scambio termico.

*Tabella 6.12 Parametri geometrici e risultati termo-fluidodinamici dei casi analizzati nella Fase D (configurazione labirintica), derivati dal caso base C2. I dati riportano l'influenza della compattezza geometrica sulle prestazioni del sistema in termini di velocità, perdite di carico ed efficacia dello scambio termico.*

Fonte: K. Mitrik

| Codice  | Caso base | Configurazione geometrica | Tipologia del condotto | Lunghezza equivalente del percorso (m) | Lunghezza in pianta (m) | Larghezza in pianta (m) | Superficie in pianta (m <sup>2</sup> ) | Spessore dei setti (m) | Interasse tra i setti (m) | Numero di setti (-) |
|---------|-----------|---------------------------|------------------------|----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|
| D_C2_L1 | C2        | 40x4                      | Labirintico            | 80                                     | 40                      | 4                       | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 1                   |
| D_C2_L2 | C2        | 20x8                      | Labirintico            | 80                                     | 20                      | 8                       | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 3                   |
| D_C2_L3 | C2        | 16x10                     | Labirintico            | 80                                     | 16                      | 10                      | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 4                   |

| Codice  | Velocità media (m/s) | Velocità outlet (m/s) | Pressione inlet (Pa) | Pressione outlet (Pa) | $\Delta P$ perdita carico (Pa) | T media (°C) | T outlet (°C) | $\Delta T$ (°C) |
|---------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------|---------------|-----------------|
| D_C2_L1 | 1.4                  | 4.9                   | 4.6                  | 0.0                   | 4.6                            | 28.5         | 23.5          | 11.5            |
| D_C2_L2 | 1.7                  | 4.8                   | 4.8                  | 0.0                   | 4.8                            | 27.8         | 22.8          | 12.2            |
| D_C2_L3 | 2.0                  | 4.7                   | 5.1                  | 0.0                   | 5.1                            | 27.0         | 21.8          | 13.2            |

### 6.10.2 Fase E – Variazione spessore setti

La Fase D ha consentito di analizzare l'influenza della configurazione labirintica sul comportamento termo-fluidodinamico del sistema TLVS, evidenziando come la compattezza geometrica incida in modo significativo sia sulla distribuzione del flusso sia sulle perdite di carico. In particolare, è emerso come l'aumento della complessità del percorso determini una progressiva crescita delle perdite localizzate e della variabilità del campo di moto, a fronte di un incremento più contenuto delle prestazioni termiche.

A partire da tali risultati, la fase successiva dell'analisi è dedicata allo studio dell'influenza dello spessore dei setti interni, parametro che incide direttamente sulla sezione di passaggio del flusso e sulla massa termica disponibile per lo scambio.

Al fine di isolare in modo rigoroso l'effetto di tale parametro, l'analisi viene condotta mantenendo costanti: la configurazione planimetrica del condotto (definita nella Fase D), la lunghezza equivalente del percorso, l'interasse tra i setti, le condizioni operative derivate dal caso C2. A differenza della Fase D, l'analisi viene estesa a tutte le configurazioni geometriche considerate (40×4, 20×8 e 16×10), al fine di valutare l'effetto dello spessore dei setti in funzione del grado di compattezza del sistema. Per ciascuna configurazione vengono considerati tre valori di spessore, pari a: 0.15 m, 0.30 m e 0.45 m. Tale impostazione consente di analizzare in modo sistematico l'interazione tra geometria del labirinto e sezione di passaggio del flusso, evidenziando come la riduzione della sezione utile influenzi le perdite di carico e le prestazioni termiche del sistema.

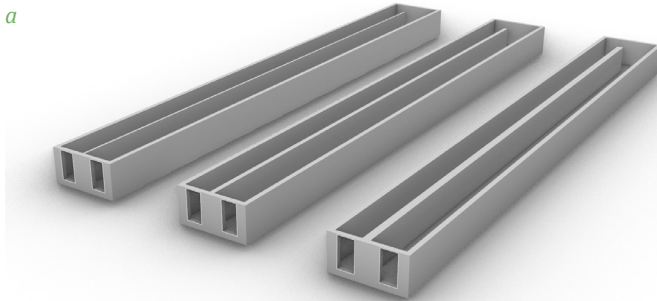
**Tabella 6.13** Fase E: variazione dello spessore dei setti nei modelli di labirinto (caso base C2), con configurazione geometrica e parametri principali costanti (superficie e interasse), al variare del numero di setti.

Fonte: K. Mitrik

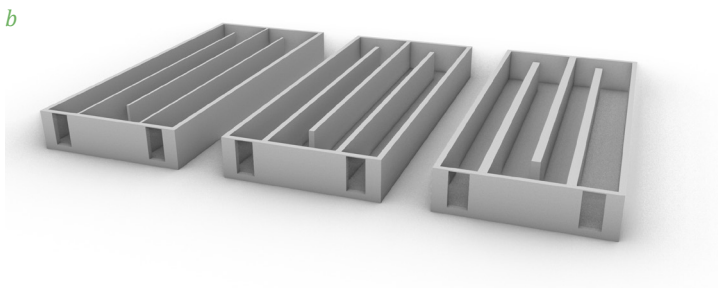
| Codice     | Caso base | Configurazione geometrica | Tipologia del condotto | Superficie in pianta (m <sup>2</sup> ) | Spessore dei setti (m) | Interasse tra i setti (m) | Numero di setti (-) |
|------------|-----------|---------------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|
| E_C2_L1_T1 | C2        | 40×4                      | Labirintico            | 160                                    | 0.15                   | 2.00                      | 1                   |
| E_C2_L1_T2 | C2        | 20×8                      | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 1                   |
| E_C2_L1_T3 | C2        | 16×10                     | Labirintico            | 160                                    | 0.45                   | 2.00                      | 1                   |
| E_C2_L2_T1 | C2        | 40×4                      | Labirintico            | 160                                    | 0.15                   | 2.00                      | 3                   |
| E_C2_L2_T2 | C2        | 20×8                      | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 3                   |
| E_C2_L2_T3 | C2        | 16×10                     | Labirintico            | 160                                    | 0.45                   | 2.00                      | 3                   |
| E_C2_L3_T1 | C2        | 40×4                      | Labirintico            | 160                                    | 0.15                   | 2.00                      | 4                   |
| E_C2_L3_T2 | C2        | 20×8                      | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 4                   |
| E_C2_L3_T3 | C2        | 16×10                     | Labirintico            | 160                                    | 0.45                   | 2.00                      | 4                   |

Le configurazioni considerate in questa fase si articolano nelle tre geometrie planimetriche  $40 \times 4$  m (L1),  $20 \times 8$  m (L2) e  $16 \times 10$  m (L3), mantenendo invariato lo sviluppo labirintico e variando unicamente lo spessore dei setti interni (Figura X). Per ciascuna configurazione sono stati definiti tre modelli, corrispondenti a spessori pari a 0.15 m, 0.30 m e 0.45 m, così da rappresentare differenti condizioni di restrizione della sezione di passaggio e di massa solida coinvolta nello scambio termico. Questa variazione, pur non modificando l'impostazione geometrica complessiva, incide sulla struttura interna dei canali e sul rapporto tra spazio fluido e materiale solido, introducendo differenze potenzialmente rilevanti nella distribuzione del moto e nei meccanismi di scambio. L'analisi comparativa tra le tre configurazioni consente inoltre di cogliere come l'effetto dello spessore si manifesti in funzione del diverso grado di compattezza del sistema, offrendo una lettura più articolata delle interazioni tra geometria e comportamento termo-fluidodinamico.

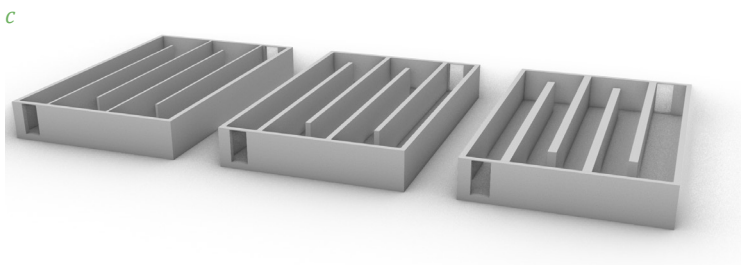
a



b



c



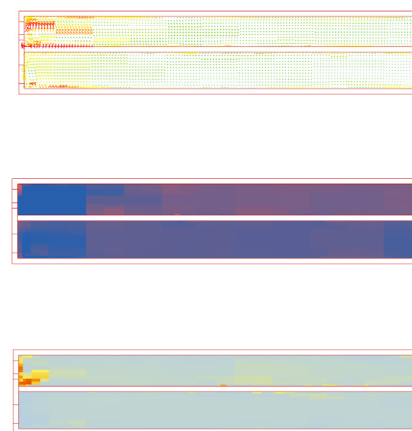
*Figura 6.144 Configurazioni geometriche della Fase E relative alle tre tipologie planimetriche del sistema TLVS ( $a=40 \times 4$ ,  $b=20 \times 8$  e  $c=16 \times 10$ ), ciascuna rappresentata per tre diversi spessori dei setti (0.15 m, 0.30 m e 0.45 m), a evidenziare la variazione della sezione utile di passaggio e della massa solida interna al condotto labirintico. Fonte: K. Mitrik*



E\_C2\_L1\_T1



E\_C2\_L1\_T2



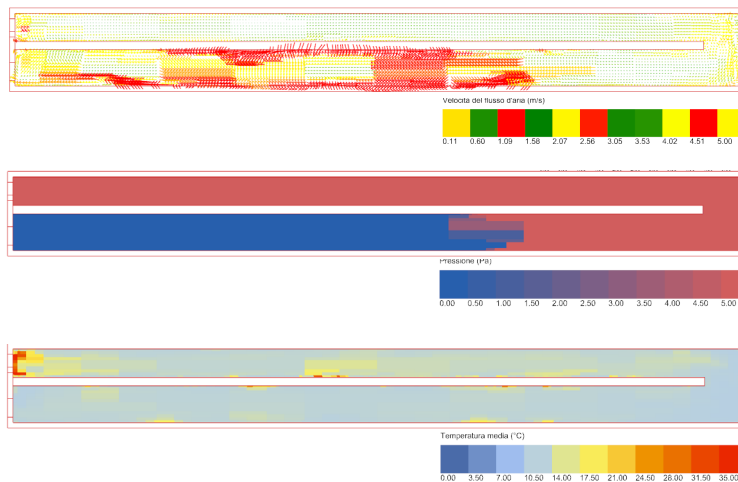
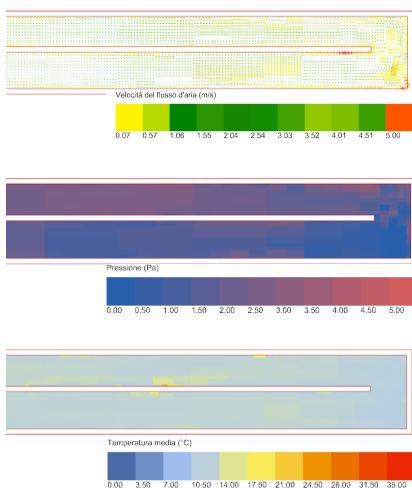
### Casi E\_C2\_L1\_T1 - E\_C2\_L1\_T2 - E\_C2\_L1\_T3

Il confronto tra i casi E\_C2\_L1\_T1, E\_C2\_L1\_T2 ed E\_C2\_L1\_T3 consente di valutare l'influenza dello spessore dei setti sul comportamento termo-fluidodinamico della configurazione labirintica L1 (40×4 m), mantenendo costanti geometria generale e condizioni operative.

Nel caso E\_C2\_L1\_T1 ( $t = 0.15$  m) il campo di velocità mostra una distribuzione più accelerata nei canali, con valori medi dell'ordine di 1.6 m/s e velocità in uscita prossime a 5.0 m/s. La minore ostruzione geometrica favorisce infatti il passaggio del flusso, ma determina anche una riduzione della massa termica disponibile. Dal punto di vista pressorio, la perdita di carico risulta la più contenuta del gruppo, pari a circa 4.3 Pa, mentre il raffreddamento è leggermente meno efficace, con  $T_{\text{outlet}} \approx 24.0$  °C e  $\Delta T \approx 11.0$  °C.

Nel caso E\_C2\_L1\_T2 ( $t = 0.30$  m) si osserva un comportamento più equilibrato. La velocità media si riduce a circa 1.4 m/s, con velocità in uscita ancora elevate ( $\approx 4.9$  m/s), ma con una distribuzione più regolare rispetto al caso T1. La perdita di carico cresce moderatamente fino a circa 4.6 Pa, mentre le prestazioni termiche migliorano: la temperatura in uscita si attesta intorno a 23.5 °C, con  $\Delta T \approx 11.5$  °C. Tale configurazione evidenzia quindi un buon compromesso tra continuità del flusso, contenimento delle perdite e capacità di scambio termico.

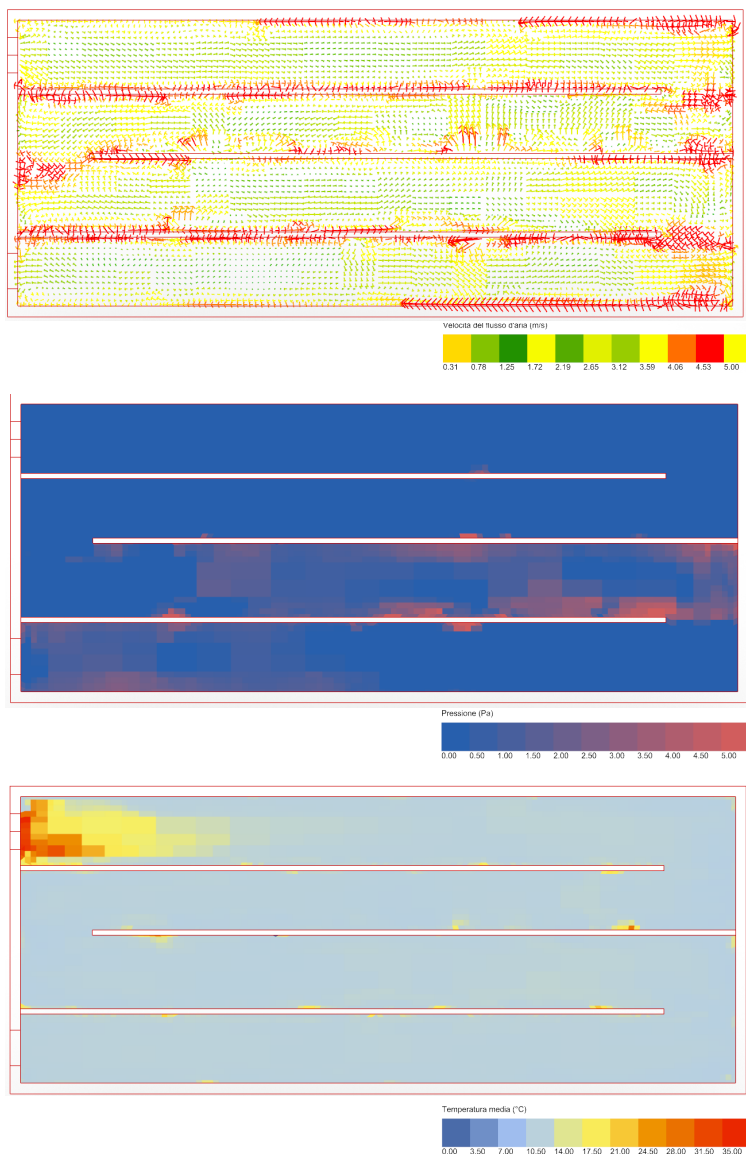
### E\_C2\_L1\_T3



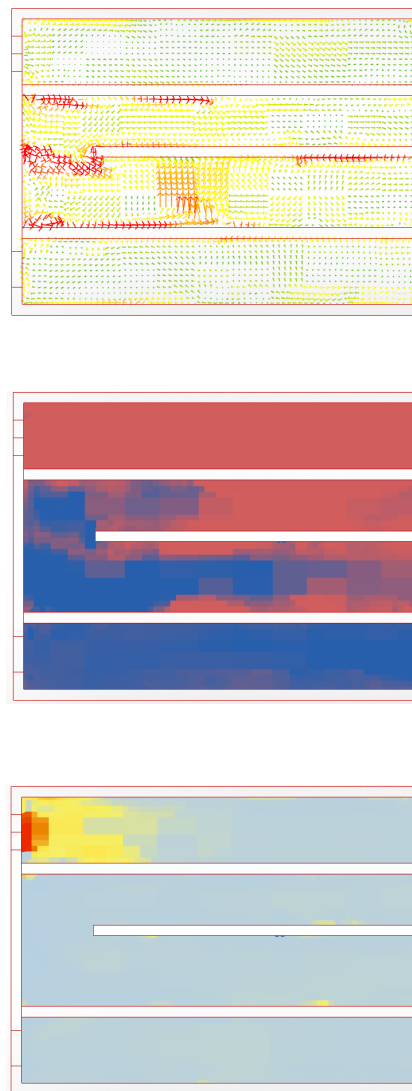
Nel caso E\_C2\_L1\_T3 ( $t = 0.45$  m) l'aumento dello spessore rende il flusso più penalizzato dal punto di vista fluidodinamico. Pur mantenendo velocità in uscita ancora prossime a 4.8 m/s, la distribuzione interna risulta più disturbata e la perdita di carico sale a circa 4.9 Pa. Sul piano termico si osserva un ulteriore miglioramento, con  $T_{\text{outlet}} \approx 23.0$  °C e  $\Delta T \approx 12.0$  °C, attribuibile alla maggiore massa termica dei setti. Tuttavia, il beneficio termico aggiuntivo rispetto al caso T2 risulta limitato, mentre la penalizzazione fluidodinamica diventa più marcata.

Per la configurazione E\_C2\_L1 il caso T2 (0.30 m) risulta il più bilanciato. Il caso T1 privilegia la fluidodinamica ma riduce l'efficacia termica, mentre il caso T3 migliora leggermente lo scambio termico a costo di perdite di carico più elevate. Lo spessore 0.30 m rappresenta quindi la soluzione più appropriata per questa configurazione labirintica, in quanto garantisce il miglior equilibrio tra  $\Delta T$  e  $\Delta P$ .

E\_C2\_L2\_T1



E\_C2\_L2\_T2

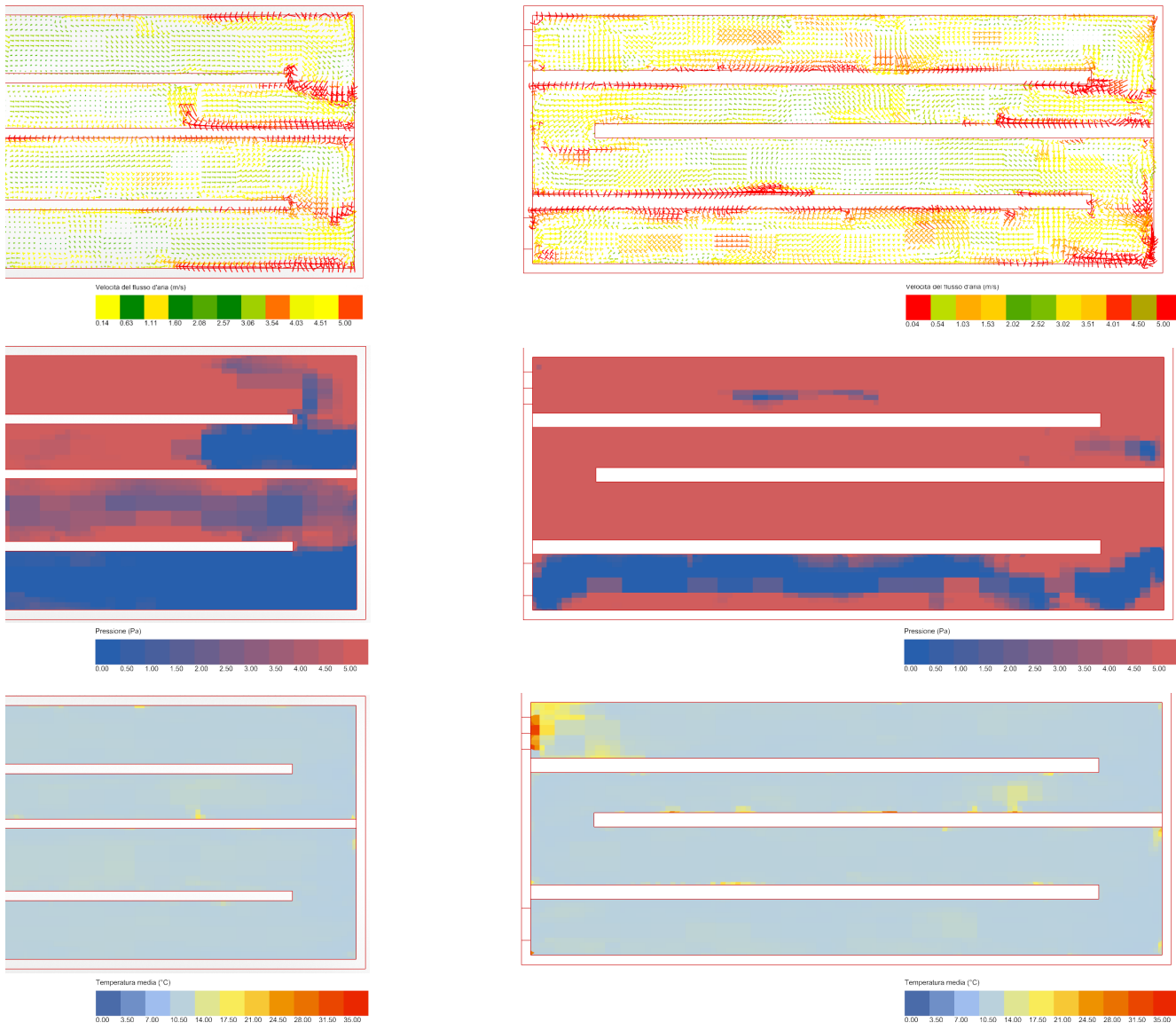


Casi E\_C2\_L2\_T1, E\_C2\_L2\_T2, E\_C2\_L2\_T3

Il confronto tra i casi E\_C2\_L2\_T1, E\_C2\_L2\_T2 ed E\_C2\_L2\_T3 consente di valutare l'influenza dello spessore dei setti nella configurazione labirintica L2 (20×8 m), caratterizzata da una compattezza maggiore rispetto al caso L1 e, quindi, da una più marcata sensibilità alle variazioni della sezione utile di passaggio. In tutti e tre i casi il campo di velocità evidenzia una distribuzione più perturbata rispetto alla configurazione 40×4 m, con accelerazioni locali che raggiungono valori prossimi a 4.8–5.0 m/s in corrispondenza dei cambi di direzione.

Nel caso E\_C2\_L2\_T1 ( $t = 0.15$  m) la sezione interna più ampia favorisce un flusso relativamente più regolare, con velocità media  $\approx 1.8$  m/s e una perdita di carico complessiva di circa 4.7 Pa. La temperatura in uscita si colloca intorno a 23.2 °C, con  $\Delta T \approx 11.8$  °C, mostrando una prestazione termica discreta ma non massima. Nel caso E\_C2\_L2\_T2 ( $t = 0.30$  m) si osserva un incremento moderato delle perdite, con  $\Delta P \approx 5.0$  Pa, associato a una lieve riduzione della velocità media ( $\approx 1.6$  m/s) e a un miglioramento

### E\_C2\_L2\_T3

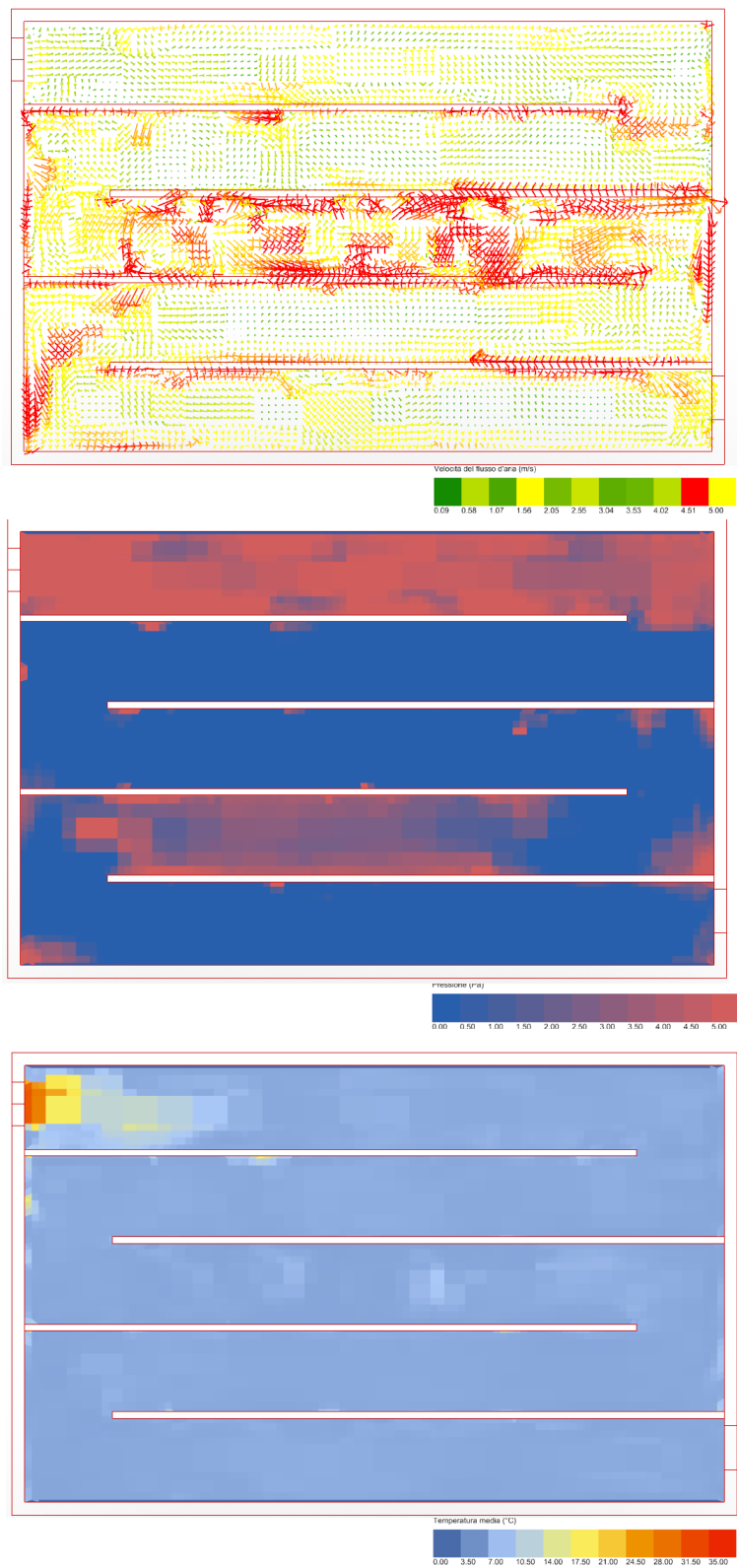


termico più evidente:  $T_{\text{outlet}} \approx 22.6^\circ\text{C}$  e  $\Delta T \approx 12.4^\circ\text{C}$ . La configurazione risulta quindi più efficace nel raffreddamento senza introdurre una penalizzazione fluidodinamica eccessiva.

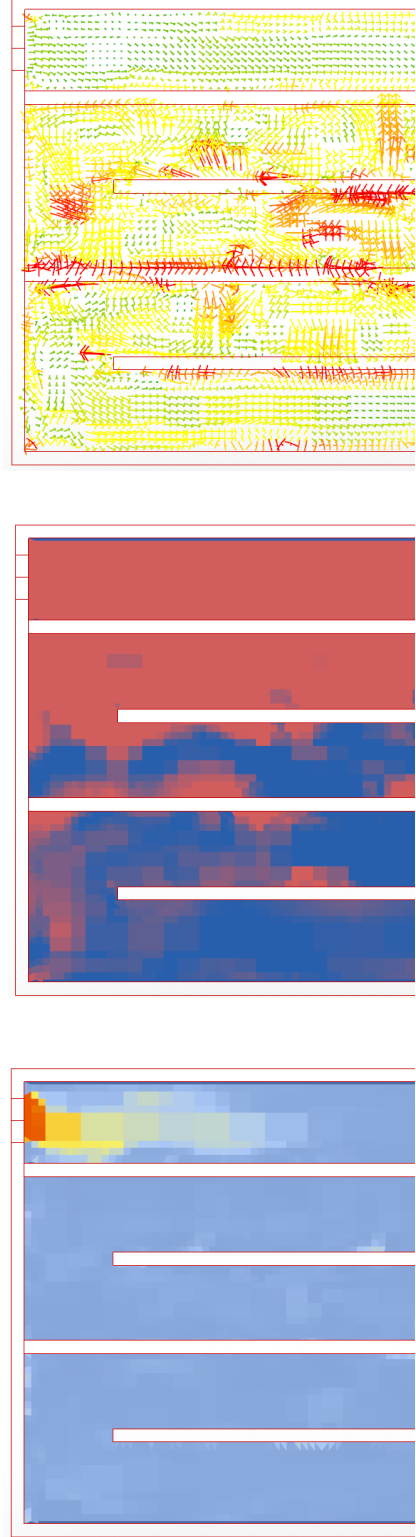
Nel caso E\_C2\_L2\_T3 ( $t = 0.45\text{ m}$ ) l'aumento dello spessore accentua le dissipazioni locali e rende il campo di moto meno uniforme. La pressione inlet sale a circa  $5.3\text{ Pa}$ , mentre la velocità media si riduce a  $1.5\text{ m/s}$ . Dal punto di vista termico si registra il valore più favorevole del gruppo, con  $T_{\text{outlet}} \approx 22.1^\circ\text{C}$  e  $\Delta T \approx 12.9^\circ\text{C}$ ; tuttavia, il beneficio rispetto al caso T2 risulta limitato, se confrontato con l'aumento delle perdite di carico.

Per la configurazione E\_C2\_L2 il caso T2 ( $0.30\text{ m}$ ) appare il più equilibrato. Il caso T1 mantiene una risposta fluidodinamica più favorevole ma con prestazioni termiche inferiori, mentre il caso T3 massimizza il raffreddamento a fronte di una penalizzazione pressoria più marcata. Lo spessore  $0.30\text{ m}$  rappresenta quindi, anche per la configurazione  $20 \times 8\text{ m}$ , la soluzione più idonea in termini di compromesso tra efficacia termica e contenimento delle perdite di carico.

E\_C2\_L3\_T1

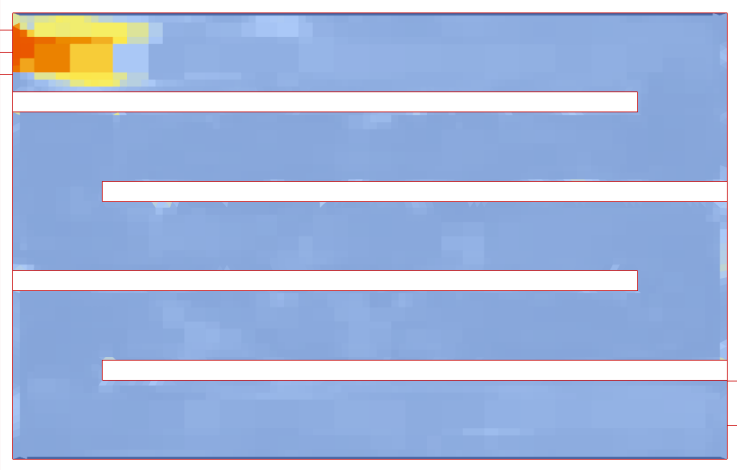
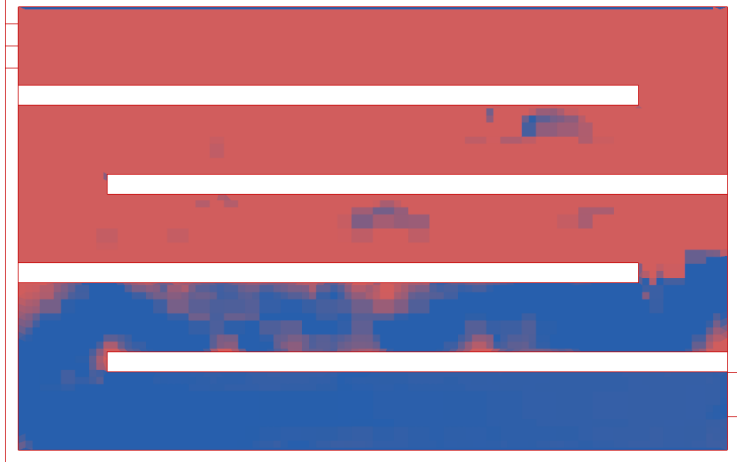
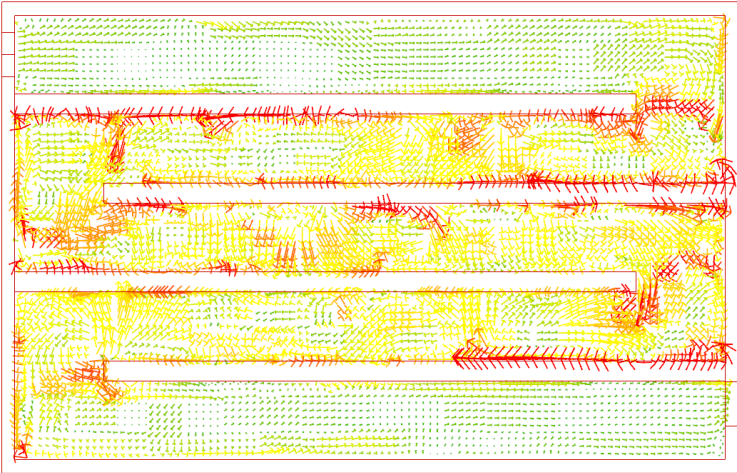
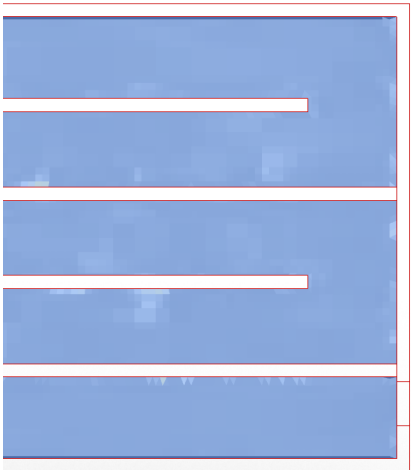
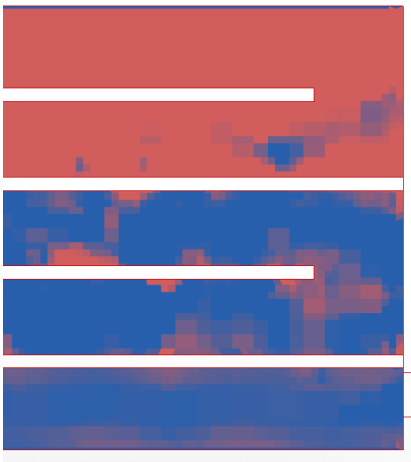
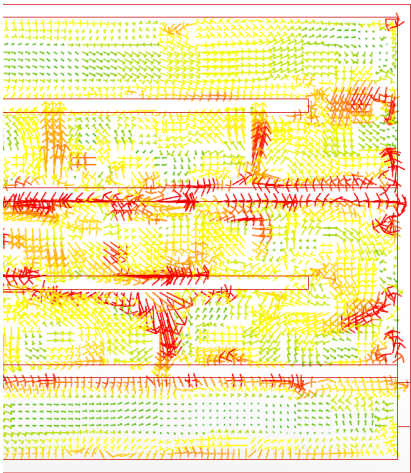


E\_C2\_L3\_T2





E\_C2\_L3\_T3





### Casi E\_C2\_L3\_T1, E\_C2\_L3\_T2, E\_C2\_L3\_T3

Il confronto tra i casi E\_C2\_L3\_T1, E\_C2\_L3\_T2 ed E\_C2\_L3\_T3 consente di valutare l'influenza dello spessore dei setti nella configurazione labirintica L3 (16×10 m), cioè quella a maggiore compattezza tra quelle analizzate. In questa configurazione il flusso risulta già fortemente perturbato per effetto della frequenza dei cambi di direzione; di conseguenza, la variazione dello spessore dei setti incide in modo ancora più evidente sia sulle perdite di carico sia sulla distribuzione interna delle velocità.

Nel caso E\_C2\_L3\_T1 ( $t = 0.15$  m) la maggiore sezione utile di passaggio consente una risposta fluidodinamica relativamente meno penalizzata, con velocità media  $\approx 2.1$  m/s e  $\Delta P \approx 5.0$  Pa. Le velocità locali raggiungono ancora valori prossimi a 4.8–5.0 m/s nei tratti di deviazione, ma il raffreddamento risulta leggermente meno efficace, con  $T_{\text{outlet}} \approx 22.0$  °C e  $\Delta T \approx 13.0$  °C. Nel caso E\_C2\_L3\_T2 ( $t = 0.30$  m) il sistema mostra un equilibrio più convincente: la velocità media si riduce a circa 1.9 m/s, la pressione inlet sale a circa 5.2 Pa, mentre le prestazioni termiche migliorano, con  $T_{\text{outlet}} \approx 21.5$  °C e  $\Delta T \approx 13.5$  °C. Il caso E\_C2\_L3\_T3 ( $t = 0.45$  m) accentua ulteriormente la penalizzazione fluidodinamica, con  $\Delta P \approx 5.5$  Pa e velocità media  $\approx 1.8$  m/s, a fronte di un incremento termico più contenuto:  $T_{\text{outlet}} \approx 21.2$  °C e  $\Delta T \approx 13.8$  °C.

Nella configurazione E\_C2\_L3 l'aumento dello spessore dei setti determina un miglioramento termico marginale ma progressivamente meno conveniente rispetto all'incremento delle perdite di carico. Per questo motivo, il caso T2 (0.30 m) risulta anche in questa configurazione il più equilibrato: il caso T1 favorisce il flusso ma riduce l'efficacia termica, mentre il caso T3 produce un beneficio termico limitato a fronte di una penalizzazione fluidodinamica più marcata. Lo spessore 0.30 m rappresenta quindi la soluzione più appropriata anche per la configurazione labirintica più compatta.

#### 6.10.2.1 Valutazione critica dell'influenza dello spessore dei setti e individuazione delle configurazioni ottimali

L'analisi condotta nella Fase E consente di evidenziare in modo chiaro il ruolo dello spessore dei setti come parametro di regolazione fine del comportamento termo-fluidodinamico del sistema TLVS, a parità di configurazione geometrica e condizioni operative. I risultati mostrano una tendenza coerente su tutte le configurazioni analizzate (L1, L2 e L3): all'aumentare dello spessore dei setti si osserva una riduzione progressiva della sezione utile di passaggio, con conseguente incremento delle perdite di carico e, parallelamente, un miglioramento delle prestazioni termiche, seppur con rendimenti decrescenti.

Dal punto di vista fluidodinamico, i dati evidenziano come il passaggio da setti sottili (0.15 m) a setti spessi (0.45 m) comporti un incremento significativo delle perdite di carico: si passa, ad esempio, da circa 4.3–4.7 Pa nei casi L1 e L2 con setti sottili fino a valori prossimi a 5.3–5.5 Pa nei casi più penalizzati (L2\_T3 e L3\_T3). Tale incremento è accompagnato da una riduzione della velocità media, che varia indicativamente da 1.6–2.1 m/s nei casi T1 a valori inferiori (1.3–1.8 m/s) nei casi T3, segnalando una maggiore resistenza complessiva del sistema al moto del fluido.

Sul piano termico, l'aumento dello spessore determina un miglioramento sistematico delle prestazioni: la temperatura in uscita si riduce progressivamente (ad esempio da circa 24.0 °C a 23.0 °C nel caso L1, e da 23.2 °C a 22.1 °C nel caso L2), con incrementi della  $\Delta T$  fino a circa +1–1.2 °C passando da T1 a T3. Tuttavia, tale beneficio risulta relativamente contenuto rispetto all'incremento delle perdite di carico, soprattutto nelle configurazioni più compatte (L2 e L3), dove il flusso è già fortemente disturbato dalla geometria labirintica.

Il confronto trasversale tra le tre configurazioni evidenzia inoltre come la sensibilità al parametro spessore non sia uniforme: nella configurazione meno compatta (L1) l'effetto è più graduale e lineare, mentre nelle configurazioni più dense (L2 e L3) l'incremento dello spessore amplifica in modo più marcato le perdite localizzate, senza un corrispondente guadagno proporzionale in termini di scambio termico.

Nel complesso, emerge chiaramente l'esistenza di un compromesso tra efficienza fluidodinamica ed efficacia termica. In tutti i casi analizzati, lo spessore intermedio (0.30 m) rappresenta la soluzione più equilibrata, in grado di garantire una buona capacità di raffreddamento.

*Tabella 6.14 Sintesi dei risultati della Fase E relativi alla variazione dello spessore dei setti per le configurazioni labirintiche 40×4, 20×8 e 16×10 (caso base C2): confronto dei principali parametri geometrici e delle prestazioni termo-fluidodinamiche (velocità, pressione e temperatura) per spessori pari a 0.15 m, 0.30 m e 0.45 m. Fonte: K. Mitrik*

damento ( $\Delta T$  elevata) senza penalizzare eccessivamente le perdite di carico. I setti sottili risultano preferibili in ottica di riduzione delle resistenze al flusso, ma meno performanti dal punto di vista termico; viceversa, i setti spessi, pur migliorando marginalmente lo scambio, introducono penalizzazioni fluidodinamiche non sempre giustificate. Questi risultati costituiscono una base solida per la selezione dei casi più rappresentativi da approfondire nella Fase F, orientando la scelta verso configurazioni che massimizzino l'equilibrio tra prestazioni energetiche e sostenibilità fluidodinamica del sistema.

| Codice     | Caso base | Configurazione geometrica | Tipologia del condotto | Lunghezza equivalente del percorso (m) | Lunghezza in pianta (m) | Larghezza in pianta (m) | Superficie in pianta (m <sup>2</sup> ) | Spessore dei setti (m) | Interasse tra i setti (m) | Numero di setti (-) |
|------------|-----------|---------------------------|------------------------|----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|
| E_C2_L1_T1 | C2        | 40×4                      | Labirintico            | 80                                     | 40                      | 4                       | 160                                    | 0.15                   | 2.00                      | 1                   |
| E_C2_L1_T2 | C2        | 40×4                      | Labirintico            | 80                                     | 40                      | 4                       | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 1                   |
| E_C2_L1_T3 | C2        | 40×4                      | Labirintico            | 80                                     | 40                      | 4                       | 160                                    | 0.45                   | 2.00                      | 1                   |
| E_C2_L2_T1 | C2        | 20×8                      | Labirintico            | 80                                     | 20                      | 8                       | 160                                    | 0.15                   | 2.00                      | 3                   |
| E_C2_L2_T2 | C2        | 20×8                      | Labirintico            | 80                                     | 20                      | 8                       | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 3                   |
| E_C2_L2_T3 | C2        | 20×8                      | Labirintico            | 80                                     | 20                      | 8                       | 160                                    | 0.45                   | 2.00                      | 3                   |
| E_C2_L3_T1 | C2        | 16×10                     | Labirintico            | 80                                     | 16                      | 10                      | 160                                    | 0.15                   | 2.00                      | 4                   |
| E_C2_L3_T2 | C2        | 16×10                     | Labirintico            | 80                                     | 16                      | 10                      | 160                                    | 0.30                   | 2.00                      | 4                   |
| E_C2_L3_T3 | C2        | 16×10                     | Labirintico            | 80                                     | 16                      | 10                      | 160                                    | 0.45                   | 2.00                      | 4                   |

| Codice     | Velocità media (m/s) | Velocità outlet (m/s) | Pressione inlet (Pa) | Pressione outlet (Pa) | $\Delta P$ perdita carico (Pa) | T media (°C) | T outlet (°C) | $\Delta T$ (°C) |
|------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------|---------------|-----------------|
| E_C2_L1_T1 | 1.6                  | 5.0                   | 4.3                  | 0.0                   | 4.3                            | 28.8         | 24.0          | 11.0            |
| E_C2_L1_T2 | 1.4                  | 4.9                   | 4.6                  | 0.0                   | 4.6                            | 28.5         | 23.5          | 11.5            |
| E_C2_L1_T3 | 1.3                  | 4.8                   | 4.9                  | 0.0                   | 4.9                            | 28.0         | 23.0          | 12.0            |
| E_C2_L2_T1 | 1.8                  | 4.9                   | 4.7                  | 0.0                   | 4.7                            | 28.0         | 23.2          | 11.8            |
| E_C2_L2_T2 | 1.6                  | 4.8                   | 5.0                  | 0.0                   | 5.0                            | 27.5         | 22.6          | 12.4            |
| E_C2_L2_T3 | 1.5                  | 4.8                   | 5.3                  | 0.0                   | 5.3                            | 27.0         | 22.1          | 12.9            |
| E_C2_L3_T1 | 2.1                  | 4.9                   | 5.0                  | 0.0                   | 5.0                            | 27.2         | 22.0          | 13.0            |
| E_C2_L3_T2 | 1.9                  | 4.8                   | 5.2                  | 0.0                   | 5.2                            | 26.8         | 21.5          | 13.5            |
| E_C2_L3_T3 | 1.8                  | 4.8                   | 5.5                  | 0.0                   | 5.5                            | 26.5         | 21.2          | 13.8            |

### 6.10.3 Fase F – Variazione della distanza tra i setti

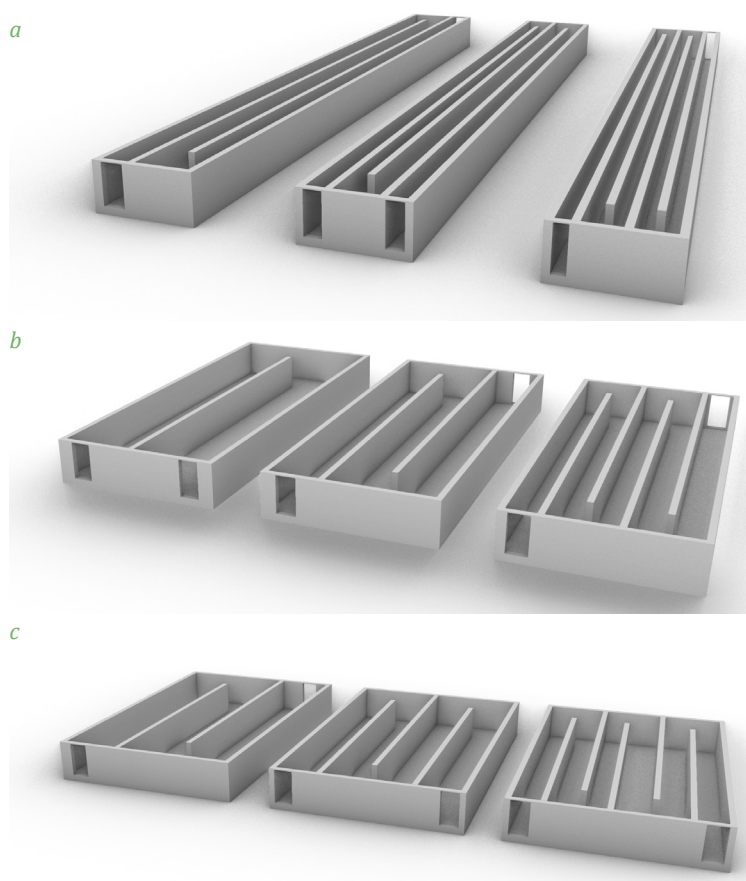
La Fase E ha consentito di analizzare in modo sistematico l'influenza dello spessore dei setti sul comportamento termo-fluidodinamico del sistema TLVS, evidenziando come tale parametro incida simultaneamente sulla sezione utile di passaggio del flusso e sulla massa termica disponibile per lo scambio. In particolare, è emerso come l'aumento dello spessore determini un miglioramento delle prestazioni termiche a fronte di un incremento delle perdite di carico, confermando l'esistenza di un compromesso tra efficienza fluidodinamica ed efficacia dello scambio. A partire da tali risultati, la fase successiva dell'analisi è dedicata allo studio dell'influenza della distanza tra i setti, ovvero della larghezza dei canali di flusso, parametro che incide direttamente sulla distribuzione delle velocità, sull'intensità dei fenomeni di ricircolo e sull'entità delle perdite di carico lungo il percorso labirintico. Al fine di isolare in modo rigoroso l'effetto di tale parametro, l'analisi viene condotta mantenendo costanti: la configurazione planimetrica del condotto (definita nella Fase D), lo spessore dei setti individuato come ottimale nella Fase E (pari a 0.30 m), la lunghezza equivalente del percorso e le condizioni operative derivate dal caso C2, incluse le aperture di ingresso e uscita. In questo modo, le variazioni osservate possono essere attribuite esclusivamente alla diversa configurazione interna dei canali di flusso. Per ciascuna configurazione geometrica considerata (40×4, 20×8 e 16×10), la distanza tra i setti non è stata imposta come valore assoluto costante, ma è stata determinata in funzione della larghezza disponibile e del numero di setti, garantendo

*Tabella 6.15 Fase F – Variazione della distanza tra i setti nei modelli di labirinto (caso base C2), con spessore e superficie costanti, e analisi degli effetti sulle aperture utili e sulla configurazione dei canali (ampi, intermedi, stretti). Fonte: K. Mitrik*

| Codice     | Caso di partenza (Fase E) | Configurazione geometrica | Tipologia del condotto | Superficie in pianta (m²) | Spessore dei setti (m) | Interasse tra i setti (m) | Numero di setti (-) | Apertura ingresso utile (m) | Apertura uscita utile (m) | Descrizione del caso |
|------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|
| F_C2_L1_N1 | E_C2_L1_T1                | 40×4                      | Labirintico            | 160                       | 0.30                   | 1,13                      | 2                   | 1                           | 1                         | Canali ampi          |
| F_C2_L1_N2 | E_C2_L1_T2                | 40×4                      | Labirintico            | 160                       | 0.30                   | 0,78                      | 3                   | 0,78                        | 0,78                      | Canali intermedi     |
| F_C2_L1_N3 | E_C2_L1_T3                | 40×4                      | Labirintico            | 160                       | 0.30                   | 0,56                      | 4                   | 0,56                        | 0,56                      | Canali stretti       |
| F_C2_L2_N2 | E_C2_L2_T1                | 20×8                      | Labirintico            | 160                       | 0.30                   | 3,85                      | 1                   | 1                           | 1                         | Canali ampi          |
| F_C2_L2_N3 | E_C2_L2_T2                | 20×8                      | Labirintico            | 160                       | 0.30                   | 2,47                      | 2                   | 1                           | 1                         | Canali intermedi     |
| F_C2_L2_N4 | E_C2_L2_T3                | 20×8                      | Labirintico            | 160                       | 0.30                   | 1,36                      | 4                   | 1                           | 1                         | Canali stretti       |
| F_C2_L3_N3 | E_C2_L3_T1                | 16×10                     | Labirintico            | 160                       | 0.30                   | 3,13                      | 2                   | 1                           | 1                         | Canali ampi          |
| F_C2_L3_N4 | E_C2_L3_T2                | 16×10                     | Labirintico            | 160                       | 0.30                   | 2,28                      | 3                   | 1                           | 1                         | Canali intermedi     |
| F_C2_L3_N5 | E_C2_L3_T3                | 16×10                     | Labirintico            | 160                       | 0.30                   | 1,42                      | 5                   | 1                           | 1                         | Canali stretti       |

do la coerenza geometrica del modello. Sono state quindi definite tre configurazioni per ciascun caso, corrispondenti a un numero crescente di setti e, conseguentemente, a una progressiva riduzione della larghezza dei canali di flusso. La variazione del numero di setti e della relativa distanza tra i canali comporta un adeguamento geometrico delle sezioni di ingresso e uscita del percorso interno, al fine di garantire la continuità del flusso e la coerenza del modello. Tali modifiche non costituiscono una nuova variazione delle condizioni al contorno, ma rappresentano un necessario adattamento geometrico della configurazione labirintica analizzata. Tale impostazione consente di analizzare in modo sistematico l'influenza della sezione fluida disponibile sul comportamento termofluidodinamico del sistema, evidenziando come la variazione della distanza tra i setti modifichi l'equilibrio tra perdite di carico, distribuzione del moto ed efficacia dello scambio termico.

*Figura 6.145 Configurazioni geometriche analizzate nella Fase F (variazione della distanza tra i setti). Le tre serie rappresentano le configurazioni planimetriche L1 ( $a=40\times4$ ), L2 ( $b=20\times8$ ) e L3 ( $c=16\times10$ ), ciascuna declinata secondo un diverso numero di setti interni e, conseguentemente, una differente distanza tra i canali di flusso. Fonte: K. Mitrik*



### Casi F\_C2\_L1\_N1, F\_C2\_L1\_N2 e F\_C2\_L1\_N3

Il confronto tra i casi F\_C2\_L1\_N1, F\_C2\_L1\_N2 e F\_C2\_L1\_N3 evidenzia come, nella configurazione labirintica 40×4 m, la riduzione progressiva della distanza tra i setti produca un effetto diretto sul bilancio tra comportamento fluidodinamico e prestazioni termiche. In tutti i casi il flusso mantiene una struttura prevalentemente longitudinale, ma l'aumento del numero di setti introduce una maggiore canalizzazione del moto e una crescita delle accelerazioni locali nelle zone terminali e nei punti di inversione.

Nel caso F\_C2\_L1\_N1, corrispondente alla configurazione più aperta, il campo di velocità risulta relativamente regolare, con valori medi dell'ordine di 1.9–2.0 m/s e picchi in uscita prossimi a 4.9–5.0 m/s. La pressione si mantiene su livelli contenuti, con una perdita di carico complessiva di circa 4.6 Pa, mentre il raffreddamento risulta efficace ma non massimo, con  $T_{\text{outlet}} \approx 22.8^\circ\text{C}$  e  $\Delta T \approx 12.2^\circ\text{C}$ .

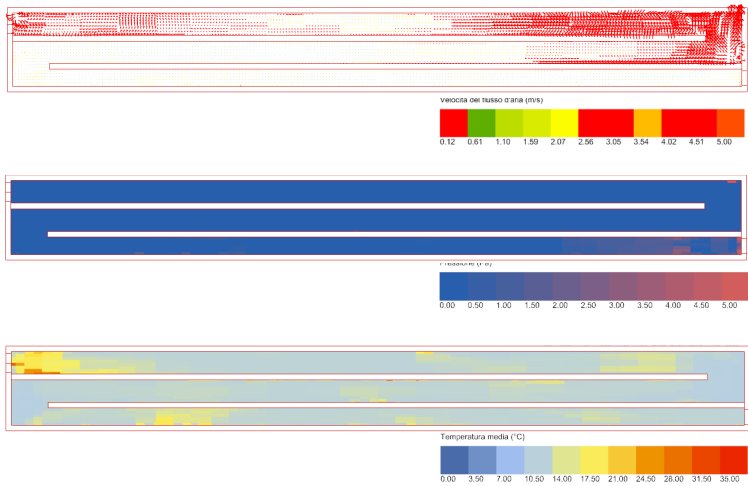
Nel caso F\_C2\_L1\_N2 si osserva una maggiore uniformità del moto nei canali e, al tempo stesso, una più evidente intensificazione delle velocità locali. La velocità media cresce fino a circa 2.2 m/s, mentre la  $\Delta P$  sale a circa 5.0 Pa. Dal punto di vista termico, la configurazione mostra un miglioramento misurabile, con  $T_{\text{outlet}} \approx 22.3^\circ\text{C}$  e  $\Delta T \approx 12.7^\circ\text{C}$ . Il comportamento complessivo appare più equilibrato, poiché il beneficio termico è accompagnato da un incremento delle perdite ancora controllato.

Nel caso F\_C2\_L1\_N3, caratterizzato dalla distanza minore tra i setti, il flusso risulta più costretto e le accelerazioni diventano più marcate. La velocità media si porta intorno a 2.5 m/s, con valori in uscita ancora prossimi a 4.7–4.8 m/s, mentre la perdita di carico raggiunge circa 5.4 Pa. Il miglioramento termico è presente ma più contenuto rispetto alla penalizzazione fluidodinamica, con  $T_{\text{outlet}} \approx 22.0^\circ\text{C}$  e  $\Delta T \approx 13.0^\circ\text{C}$ .

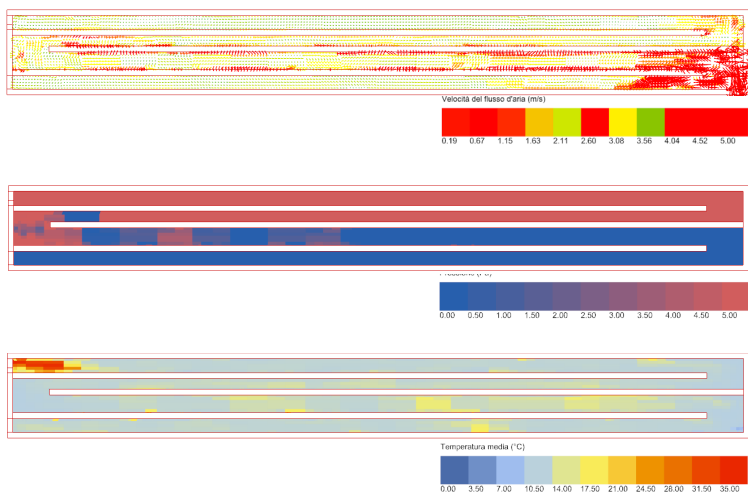
Per la configurazione L1, il caso F\_C2\_L1\_N2 risulta il più equilibrato: rispetto a N1 garantisce un incremento apprezzabile dello scambio termico, mentre rispetto a N3 evita un aumento eccessivo delle perdite di carico. La configurazione intermedia rappresenta quindi il miglior compromesso tra continuità del flusso, stabilità del campo di moto ed efficacia termica.



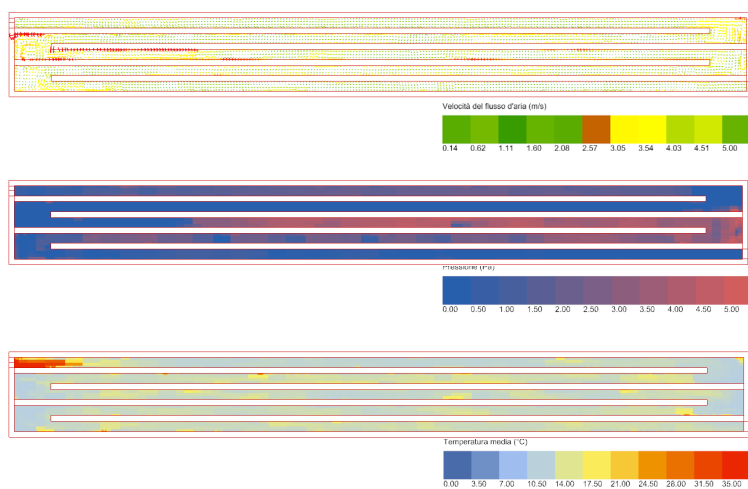
F\_C2\_L1\_N1



F\_C2\_L1\_N2



F\_C2\_L1\_N3



### Casi F\_C2\_L2\_N2, F\_C2\_L2\_N3 e F\_C2\_L2\_N4

Il confronto tra i casi F\_C2\_L2\_N2, F\_C2\_L2\_N3 e F\_C2\_L2\_N4 consente di valutare l'effetto della progressiva riduzione della distanza tra i setti nella configurazione labirintica L2 (20×8 m), caratterizzata da una compattezza intermedia e da una maggiore articolazione del percorso rispetto alla configurazione L1. In tutti e tre i casi il flusso si sviluppa lungo canali più definiti, con una distribuzione del moto che tende a concentrarsi nei tratti di passaggio e nelle zone terminali, dove si osservano i principali effetti di accelerazione e di dissipazione.

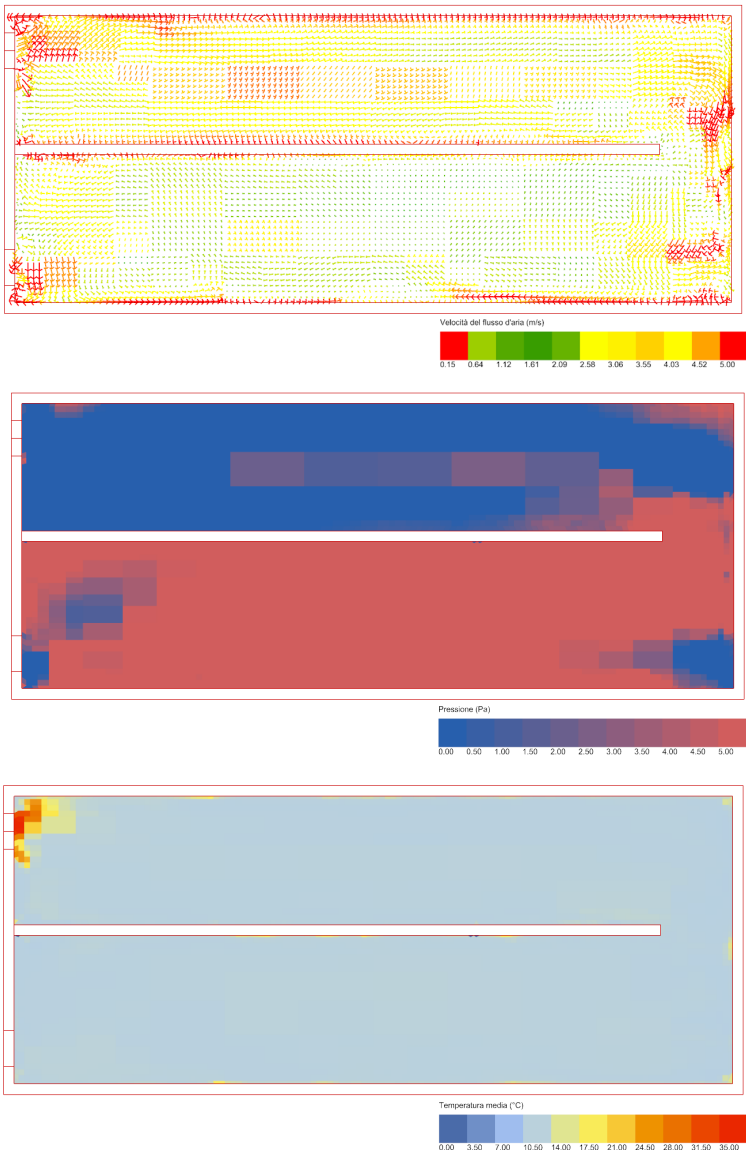
Nel caso F\_C2\_L2\_N2, corrispondente alla configurazione più aperta del gruppo, il campo di velocità risulta relativamente regolare, con valori medi dell'ordine di 1.8 m/s e velocità in uscita ancora prossime a 4.9 m/s. Dal punto di vista pressorio, la perdita di carico si mantiene su valori moderati, pari a circa 4.8 Pa, mentre il raffreddamento dell'aria risulta già significativo, con  $T_{\text{outlet}} \approx 22.6^\circ\text{C}$  e  $\Delta T \approx 12.4^\circ\text{C}$ .

Nel caso F\_C2\_L2\_N3 il numero maggiore di setti comporta una riduzione della larghezza dei canali e una più marcata canalizzazione del flusso. La velocità media cresce fino a circa 2.0 m/s, mentre la  $\Delta P$  aumenta a circa 5.1 Pa. Sul piano termico si osserva un miglioramento apprezzabile, con  $T_{\text{outlet}} \approx 22.1^\circ\text{C}$  e  $\Delta T \approx 12.9^\circ\text{C}$ . La configurazione evidenzia quindi un equilibrio convincente tra incremento dello scambio e contenimento delle perdite.

Nel caso F\_C2\_L2\_N4, caratterizzato dalla distanza minore tra i setti, il flusso risulta più vincolato e i campi di velocità mostrano una maggiore concentrazione nei tratti di passaggio, con velocità media  $\approx 2.3$  m/s e valori in uscita dell'ordine di 4.8 m/s. La penalizzazione fluidodinamica diventa più marcata, con  $\Delta P \approx 5.5$  Pa, mentre il miglioramento termico risulta più contenuto rispetto all'aumento delle perdite, con  $T_{\text{outlet}} \approx 21.8^\circ\text{C}$  e  $\Delta T \approx 13.2^\circ\text{C}$ .

Per la configurazione L2, il caso F\_C2\_L2\_N3 risulta il più equilibrato. Rispetto a N2, offre un incremento termico misurabile, mentre rispetto a N4 evita una crescita eccessiva delle perdite di carico. La configurazione intermedia si conferma pertanto come la soluzione più adatta a garantire un buon compromesso tra efficacia dello scambio termico e stabilità fluidodinamica del sistema.

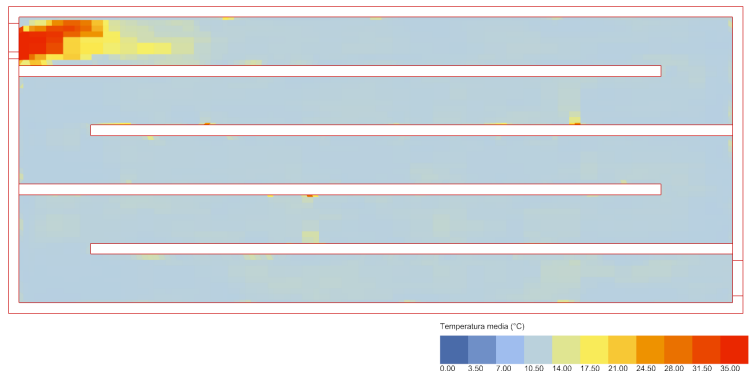
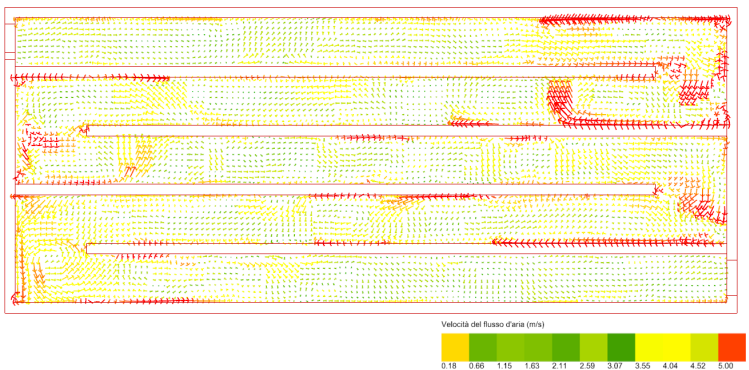
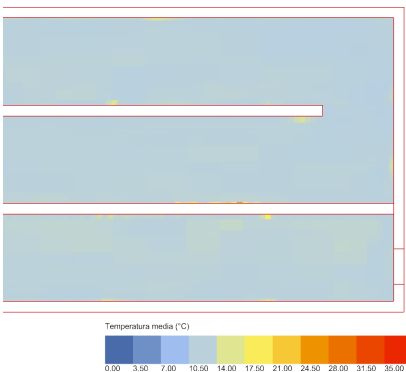
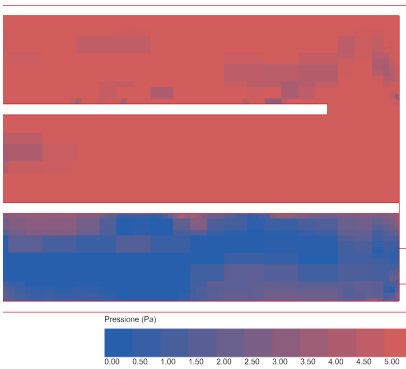
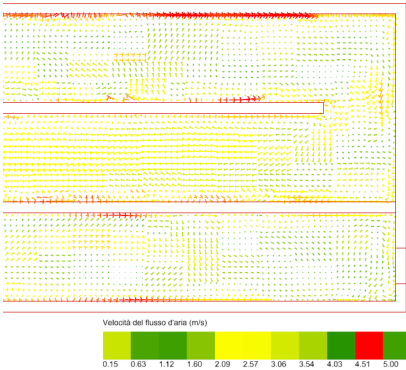
F\_C2\_L2\_N2



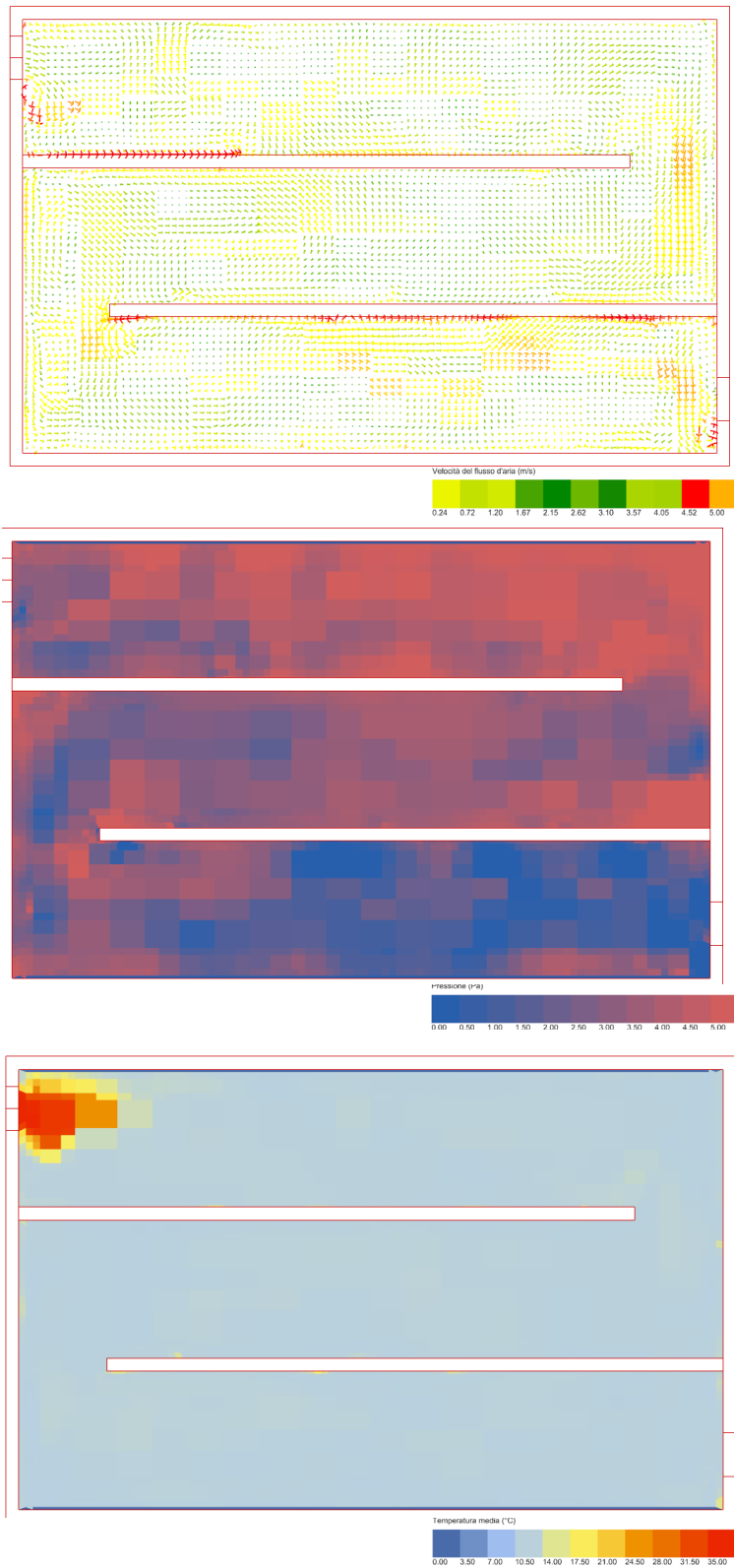
F\_C2\_L2\_N3



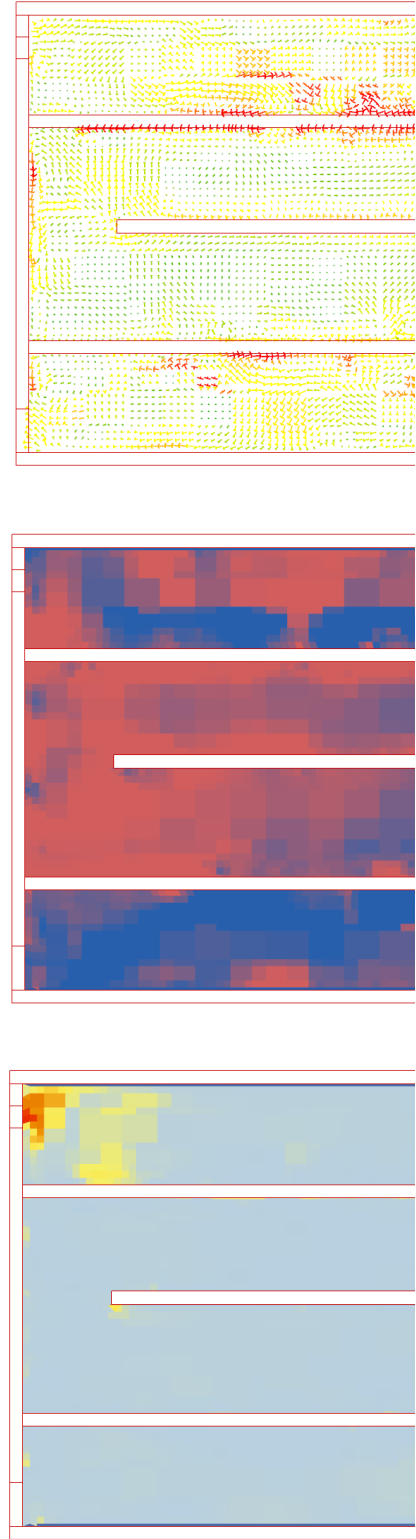
F\_C2\_L2\_N4



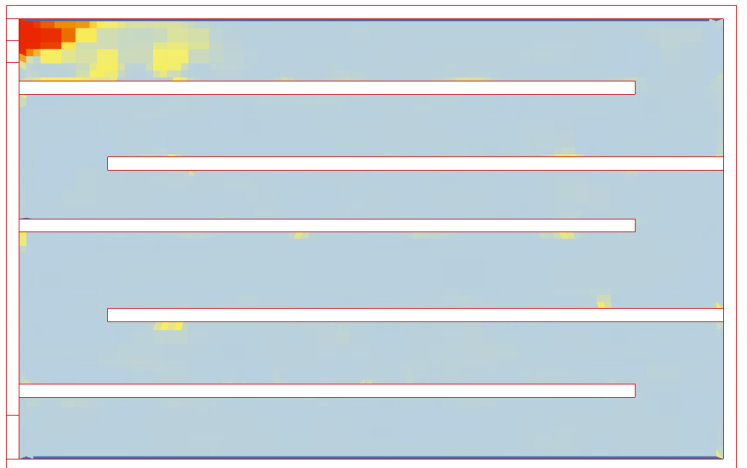
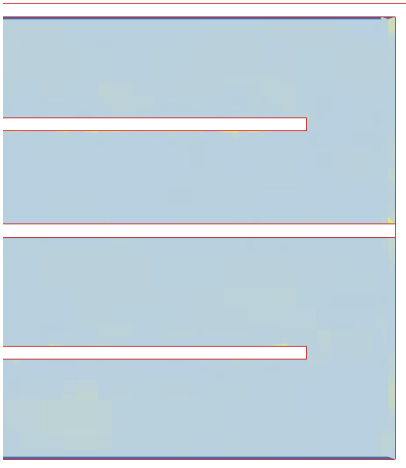
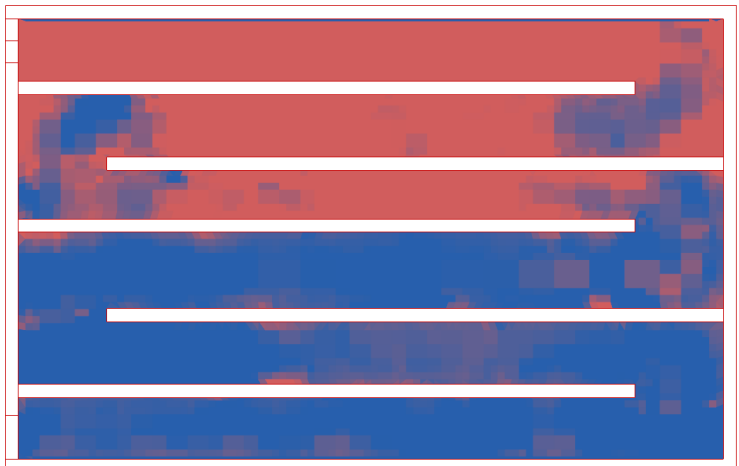
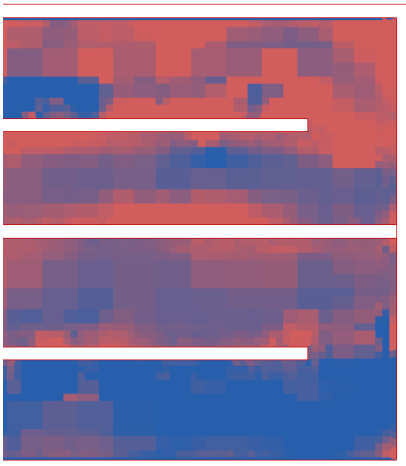
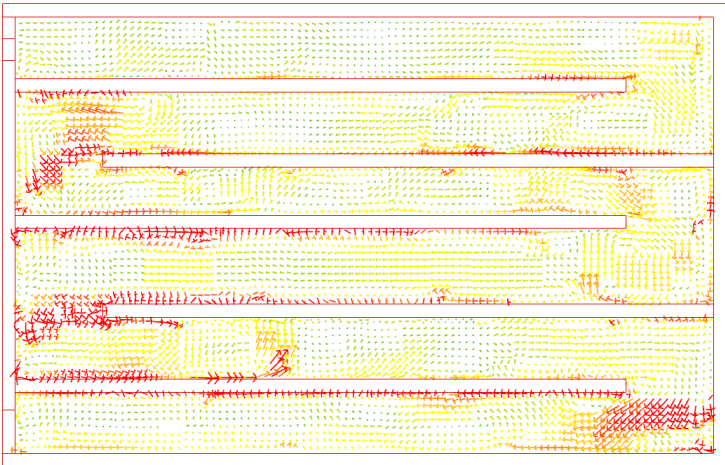
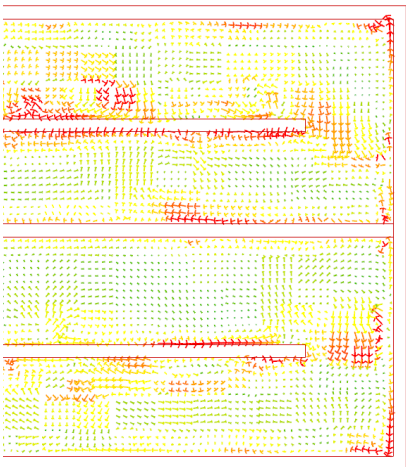
E\_C2\_L3\_T1



E\_C2\_L3\_T2



E\_C2\_L3\_T3





### Casi F\_C2\_L3\_N3, F\_C2\_L3\_N4 e F\_C2\_L3\_N5

Il confronto tra i casi F\_C2\_L3\_N3, F\_C2\_L3\_N4 e F\_C2\_L3\_N5 permette di analizzare l'effetto della progressiva riduzione della distanza tra i setti nella configurazione labirintica L3 (16×10 m), cioè la più compatta tra quelle investigate. In questa configurazione il flusso è già caratterizzato da un'interazione più intensa con le superfici interne e da una più elevata frequenza dei cambi di direzione; di conseguenza, la variazione del numero di setti produce effetti particolarmente evidenti sia sulla distribuzione del moto sia sulle perdite di carico.

Nel caso F\_C2\_L3\_N3, corrispondente alla configurazione più aperta del gruppo, il flusso conserva una buona continuità lungo i canali, con velocità media dell'ordine di 2.0 m/s e valori in uscita prossimi a 4.8–4.9 m/s. La perdita di carico si colloca intorno a 5.2 Pa, mentre il comportamento termico risulta già favorevole, con  $T_{\text{outlet}} \approx 21.6$  °C e  $\Delta T \approx 13.4$  °C.

Nel caso F\_C2\_L3\_N4 la maggiore densità di setti determina una più marcata canalizzazione del flusso e una crescita delle accelerazioni locali. La velocità media aumenta fino a circa 2.2 m/s, mentre la  $\Delta P$  sale a circa 5.5 Pa. Il raffreddamento migliora ulteriormente, con  $T_{\text{outlet}} \approx 21.2$  °C e  $\Delta T \approx 13.8$  °C, configurando una condizione intermedia in cui l'incremento delle prestazioni termiche resta ancora proporzionato alla penalizzazione fluidodinamica.

Nel caso F\_C2\_L3\_N5, caratterizzato dalla distanza minima tra i setti, il flusso risulta più vincolato e le perdite localizzate assumono un ruolo predominante. La velocità media raggiunge circa 2.5 m/s, con velocità in uscita prossime a 4.7–4.8 m/s, mentre la perdita di carico si porta a circa 5.9 Pa. Sul piano termico, il miglioramento rispetto al caso precedente è modesto, con  $T_{\text{outlet}} \approx 20.9$  °C e  $\Delta T \approx 14.1$  °C, evidenziando un beneficio marginale che non compensa pienamente l'aumento delle dissipazioni.

Per la configurazione L3, il caso F\_C2\_L3\_N4 rappresenta la soluzione più equilibrata. Rispetto a N3, consente un miglioramento termico apprezzabile, mentre rispetto a N5 evita un incremento eccessivo delle perdite di carico. Anche nella configurazione più compatta, quindi, la soluzione intermedia si conferma come quella più adatta a garantire un compromesso efficace tra stabilità fluidodinamica e prestazioni di raffrescamento.

#### 6.10.3.1 Valutazione critica dell'influenza della distanza tra i setti e individuazione delle configurazioni ottimali

L'analisi condotta nella Fase F consente di evidenziare in modo sistematico il ruolo della distanza tra i setti come parametro determinante nel bilanciamento tra prestazioni fluidodinamiche e termiche del sistema TLVS. I risultati sintetizzati (Tabella 6.x) mostrano una tendenza coerente nelle tre configurazioni analizzate (L1, L2 e L3): alla riduzione della distanza tra i setti, e quindi all'aumento del numero di canali, corrisponde un incremento progressivo delle perdite di carico e, parallelamente, un miglioramento dell'efficacia dello scambio termico. Dal punto di vista fluidodinamico, i dati evidenziano come la  $\Delta P$  aumenti in modo significativo al crescere della compattezza del sistema: si passa da valori prossimi a 4.6–4.8 Pa nei casi con canali ampi (ad esempio F\_C2\_L1\_N1 e F\_C2\_L2\_N2) fino a circa 5.9 Pa nel caso più penalizzato (F\_C2\_L3\_N5). Tale incremento è associato a una crescita della velocità media, che varia indicativamente da 1.8–2.0 m/s fino a circa 2.5 m/s, indicando una maggiore accelerazione del flusso nei canali più stretti e una più intensa dissipazione energetica dovuta a fenomeni di attrito e ricircolo. Sul piano termico, la riduzione della distanza tra i setti comporta un miglioramento sistematico delle prestazioni: la temperatura in uscita si riduce progressivamente (ad esempio da circa 22.8 °C nel caso F\_C2\_L1\_N1 fino a 22.0 °C nel caso F\_C2\_L1\_N3, e da 21.6 °C fino a 20.9 °C nella configurazione L3), con un incremento della  $\Delta T$  che raggiunge valori fino a 14.1 °C nel caso più compatto (F\_C2\_L3\_N5). Tuttavia, come già osservato nella fase precedente, tale beneficio presenta rendimenti decrescenti rispetto all'incremento delle perdite di carico, soprattutto nelle configurazioni più dense. Il confronto tra le configurazioni evidenzia come la sensibilità al parametro distanza tra i setti sia funzione del grado di compattezza geometrica: nella configurazione L1 l'incremento delle prestazioni è più graduale e controllato, mentre nelle configurazioni L2 e L3 la riduzione della distanza amplifica in modo marcato le perdite localizzate, senza un proporzionale miglioramento delle prestazioni termiche. L'analisi dei risultati (Tabella 6.x) conferma l'esistenza di un compromesso ottimale tra efficienza fluidodinamica ed efficacia termica. Tra i casi analizzati, le configurazioni intermedie risultano le più equilibrate; in particolare, il caso F\_C2\_L2\_N3 emerge come soluzione ottimale, in quanto combina una  $\Delta T$  elevata ( $\approx 13.2$  °C) con perdite di carico ancora contenute ( $\approx 5.5$  Pa), evitando le penalizzazioni più marcate osservate nei casi più compatti. Analogamente,

anche i casi F\_C2\_L1\_N2 e F\_C2\_L3\_N4 mostrano un buon equilibrio, ma con prestazioni complessive leggermente inferiori o più sbilanciate. Le configurazioni con canali più ampi risultano vantaggiose in termini di riduzione delle perdite di carico, ma meno efficaci dal punto di vista termico; al contrario, quelle più compatte massimizzano lo scambio ma introducono penalizzazioni fluidodinamiche rilevanti. Pertanto, le soluzioni intermedie rappresentano il miglior compromesso progettuale, fornendo indicazioni operative utili per la definizione di configurazioni TLVS efficienti e realisticamente applicabili.

*Tabella 6.16 Fase F – Variazione della distanza tra i setti nei modelli di labirinto (caso base C2), con spessore e superficie costanti, e analisi degli effetti sulle aperture utili e sulla configurazione dei canali (ampi, intermedi, stretti). Fonte: K. Mitrik*

| Codice     | Caso di partenza (Fase E) | Configurazione geometrica | Tipologia del condotto | Superficie in pianta (m <sup>2</sup> ) | Spessore dei setti (m) | Interasse tra i setti (m) | Numero di setti (-) | Apertura ingresso utile (m) | Apertura uscita utile (m) | Descrizione del caso |
|------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|
| F_C2_L1_N1 | E_C2_L1_T1                | 40×4                      | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 1,13                      | 2                   | 1                           | 1                         | Canali ampi          |
| F_C2_L1_N2 | E_C2_L1_T2                | 40×4                      | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 0,78                      | 3                   | 0,78                        | 0,78                      | Canali intermedi     |
| F_C2_L1_N3 | E_C2_L1_T3                | 40×4                      | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 0,56                      | 4                   | 0,56                        | 0,56                      | Canali stretti       |
| F_C2_L2_N2 | E_C2_L2_T1                | 20×8                      | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 3,85                      | 1                   | 1                           | 1                         | Canali ampi          |
| F_C2_L2_N3 | E_C2_L2_T2                | 20×8                      | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 2,47                      | 2                   | 1                           | 1                         | Canali intermedi     |
| F_C2_L2_N4 | E_C2_L2_T3                | 20×8                      | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 1,36                      | 4                   | 1                           | 1                         | Canali stretti       |
| F_C2_L3_N3 | E_C2_L3_T1                | 16×10                     | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 3,13                      | 2                   | 1                           | 1                         | Canali ampi          |
| F_C2_L3_N4 | E_C2_L3_T2                | 16×10                     | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 2,28                      | 3                   | 1                           | 1                         | Canali intermedi     |
| F_C2_L3_N5 | E_C2_L3_T3                | 16×10                     | Labirintico            | 160                                    | 0.30                   | 1,42                      | 5                   | 1                           | 1                         | Canali stretti       |

| Codice     | Velocità media (m/s) | Velocità outlet (m/s) | Pressione inlet (Pa) | Pressione outlet (Pa) | ΔP perdita carico (Pa) | T media (°C) | T outlet (°C) | ΔT (°C) |
|------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|--------------|---------------|---------|
| F_C2_L1_N1 | 2.0                  | 4.9                   | 4.6                  | 0.0                   | 4.6                    | 28.0         | 22.8          | 12.2    |
| F_C2_L1_N2 | 2.2                  | 4.8                   | 5.0                  | 0.0                   | 5.0                    | 27.6         | 22.3          | 12.7    |
| F_C2_L1_N3 | 2.5                  | 4.7                   | 5.4                  | 0.0                   | 5.4                    | 27.2         | 22.0          | 13.0    |
| F_C2_L2_N2 | 1.8                  | 4.9                   | 4.8                  | 0.0                   | 4.8                    | 27.5         | 22.6          | 12.4    |
| F_C2_L2_N3 | 2.0                  | 4.8                   | 5.1                  | 0.0                   | 5.1                    | 27.0         | 22.1          | 12.9    |
| F_C2_L2_N4 | 2.3                  | 4.8                   | 5.5                  | 0.0                   | 5.5                    | 26.7         | 21.8          | 13.2    |
| F_C2_L3_N3 | 2.0                  | 4.9                   | 5.2                  | 0.0                   | 5.2                    | 26.8         | 21.6          | 13.4    |
| F_C2_L3_N4 | 2.2                  | 4.8                   | 5.5                  | 0.0                   | 5.5                    | 26.4         | 21.2          | 13.8    |
| F_C2_L3_N5 | 2.5                  | 4.8                   | 5.9                  | 0.0                   | 5.9                    | 26.1         | 20.9          | 14.1    |

## 6.11 Conclusioni delle Simulazioni CFD del sistema TLVS

L'analisi condotta ha permesso di esplorare in modo progressivo e sistematico il comportamento termo-fluidodinamico del sistema TLVS, passando da configurazioni semplificate a soluzioni geometriche più articolate e realistiche. Il percorso metodologico adottato ha consentito di isolare l'effetto dei principali parametri progettuali, individuando configurazioni ottimali in termini di equilibrio tra prestazioni termiche e perdite di carico.

### Fase A – Dimensionamento del condotto

**Obiettivo:** definizione delle dimensioni ottimali del condotto.

**Esito:** è emersa una forte dipendenza delle prestazioni dal rapporto tra lunghezza e sezione.

**Caso ottimale:** configurazioni intermedie, in grado di garantire sufficiente superficie di scambio senza eccessive resistenze al flusso.

**Considerazione:** sezioni troppo ridotte migliorano lo scambio ma penalizzano fortemente la fluidodinamica; sezioni troppo ampie riducono l'efficacia termica.

### Fase B – Variazione della velocità dell'aria

**Obiettivo:** valutare l'influenza della velocità sul bilancio energetico.

**Caso ottimale:** velocità intermedia.

**Motivazione:** velocità basse → maggiore tempo di permanenza ma scarsa capacità di trasporto; velocità elevate → riduzione del tempo di scambio e incremento delle perdite; velocità intermedia → miglior compromesso tra scambio e perdite.

**Conclusione:** il sistema TLVS non beneficia di condizioni estreme, ma di un regime di funzionamento bilanciato.

### Fase C – Condizioni al contorno (aperture e chiusure)

**Obiettivo:** analisi dell'influenza delle aperture e delle chiusure.

**Caso ottimale:** C2

**Motivazione:** garantisce un equilibrio tra portata d'aria e conteni-

mento delle perdite; rappresenta condizioni operative realistiche.

**Ruolo nella ricerca:** C2 viene assunto come caso di riferimento per tutte le fasi successive.

#### Fase D – Introduzione della geometria labirintica

**Obiettivo:** valutare l'effetto della configurazione labirintica.

**Caso ottimale:** configurazione intermedia (L2 – 20×8).

**Motivazione:** aumento della lunghezza del percorso → incremento dello scambio termico; eccessiva complessità (L3) → perdite di carico elevate e flusso instabile; configurazione L2 → miglior equilibrio tra incremento della  $\Delta T$  e contenimento delle perdite.

**Conclusione:** la geometria labirintica è efficace, ma solo entro un certo grado di complessità.

#### Fase E – Variazione dello spessore dei setti

**Caso ottimale:** spessore intermedio (0.30 m).

**Motivazione:** setti sottili → minori perdite ma scambio limitato; setti spessi → miglioramento termico marginale ma forte aumento della  $\Delta P$ ; setti intermedi → equilibrio tra massa termica e sezione di passaggio.

**Dato chiave:** incremento  $\Delta T$  limitato ( $+1 \div +1.2$  °C) a fronte di aumenti significativi delle perdite nei casi più spessi.

**Conclusione:** lo spessore è un parametro di regolazione fine, ma con rendimenti decrescenti.

#### Fase F – Variazione della distanza tra i setti

**Caso ottimale:** F\_C2\_L2\_N3

**Motivazione:**  $\Delta T$  elevata ( $\approx 13.2$  °C); perdite di carico ancora contenute ( $\approx 5.5$  Pa); configurazione stabile senza eccessivi fenomeni di ricircolo.

**Trend osservato:** canali ampi → minori perdite ma scambio ridotto; canali stretti → massimo scambio ma forte penalizzazione fluidodinamica; configurazioni intermedie → miglior compromesso.

**Conclusione:** la distanza tra i setti è il parametro più sensibile e determinante nella regolazione delle prestazioni.

La configurazione ottimale complessiva individuata dall'analisi integrata delle diverse fasi di simulazione corrisponde a un sistema TLVS a sviluppo labirintico caratterizzato dalla configurazione planimetrica L2 (20×8), associata a uno spessore dei setti pari a 0.30 m e a una distanza tra i setti intermedia (caso F\_C2\_L2\_N3), operante nelle condizioni al contorno definite dal caso C2. Tale combinazione rappresenta il miglior equilibrio tra prestazioni termiche e compor-

tamento fluidodinamico, consentendo di ottenere un'elevata capacità di raffrescamento passivo, con valori di  $\Delta T$  prossimi ai 13 °C, a fronte di perdite di carico ancora contenute, dell'ordine di 5.5 Pa. La configurazione L2, rispetto alle soluzioni meno compatte (L1) e a quelle più dense (L3), si dimostra particolarmente efficace nel coniugare un adeguato sviluppo del percorso dell'aria con una distribuzione del flusso relativamente uniforme, limitando al contempo l'insorgenza di fenomeni di ricircolo e dissipazioni localizzate. L'adozione di uno spessore intermedio dei setti consente inoltre di bilanciare la riduzione della sezione utile con un incremento della massa termica disponibile, evitando le penalizzazioni fluidodinamiche tipiche delle configurazioni più massicce. Analogamente, una distanza tra i setti non eccessivamente ridotta garantisce un'intensificazione dello scambio termico senza determinare un aumento sproporzionato delle resistenze al flusso. Questa configurazione si configura come la soluzione più idonea in un'ottica progettuale realistica, in grado di massimizzare l'efficacia del sistema TLVS mantenendo un comportamento stabile e sostenibile dal punto di vista termo-fluidodinamico.

### Valutazione complessiva del sistema TLVS

#### Vantaggi

- Incremento significativo dello scambio termico passivo
- Possibilità di ottimizzazione geometrica fine (parametrica)
- Adattabilità a contesti reali con vincoli di spazio
- Riduzione del fabbisogno energetico per il raffrescamento
- Buon controllo del comportamento del flusso attraverso la geometria

#### Limiti

- Elevata sensibilità ai parametri geometrici
- Incremento rapido delle perdite di carico in configurazioni compatte
- Benefici termici non proporzionali all'aumento della complessità
- Possibile insorgenza di ricircoli e disuniformità del flusso
- Necessità di un accurato dimensionamento progettuale

Il sistema TLVS si conferma come una soluzione efficace per il raffrescamento passivo, ma la sua efficienza dipende fortemente da un equilibrio progettuale accurato. Le simulazioni dimostrano che non è la massimizzazione dei singoli parametri (lunghezza, spessore, compattezza) a determinare le migliori prestazioni, bensì la loro combinazione ottimale. In questa prospettiva, il sistema non deve



essere interpretato come un sistema standardizzato, ma come un dispositivo adattivo, la cui efficacia emerge dalla capacità di integrare geometria, condizioni operative e comportamento fluidodinamico in un unico quadro progettuale coerente.

La selezione delle configurazioni più efficaci si è basata su un quadro di valutazione multicriteriale derivato dall'analisi dei risultati delle simulazioni. In particolare, sono stati considerati tre principali indicatori di prestazione:

#### **Riduzione della temperatura dell'aria ( $\Delta T$ ):**

Questo parametro rappresenta l'indicatore primario dell'efficacia termica del sistema TLVS, in quanto misura la capacità del sistema di preraffreddare l'aria in ingresso. Sono state privilegiate le configurazioni che fornivano riduzioni di temperatura più elevate e stabili lungo il condotto.

#### **Comportamento del flusso:**

I modelli di flusso d'aria sono stati valutati qualitativamente e quantitativamente, con particolare attenzione alla distribuzione della velocità, alla presenza di zone di ricircolo e alla continuità del flusso. Le configurazioni che garantivano un flusso d'aria uniforme e stabile, con turbolenza limitata e ricircolo ridotto, sono state considerate più efficienti in termini di scambio termico e affidabilità del sistema.

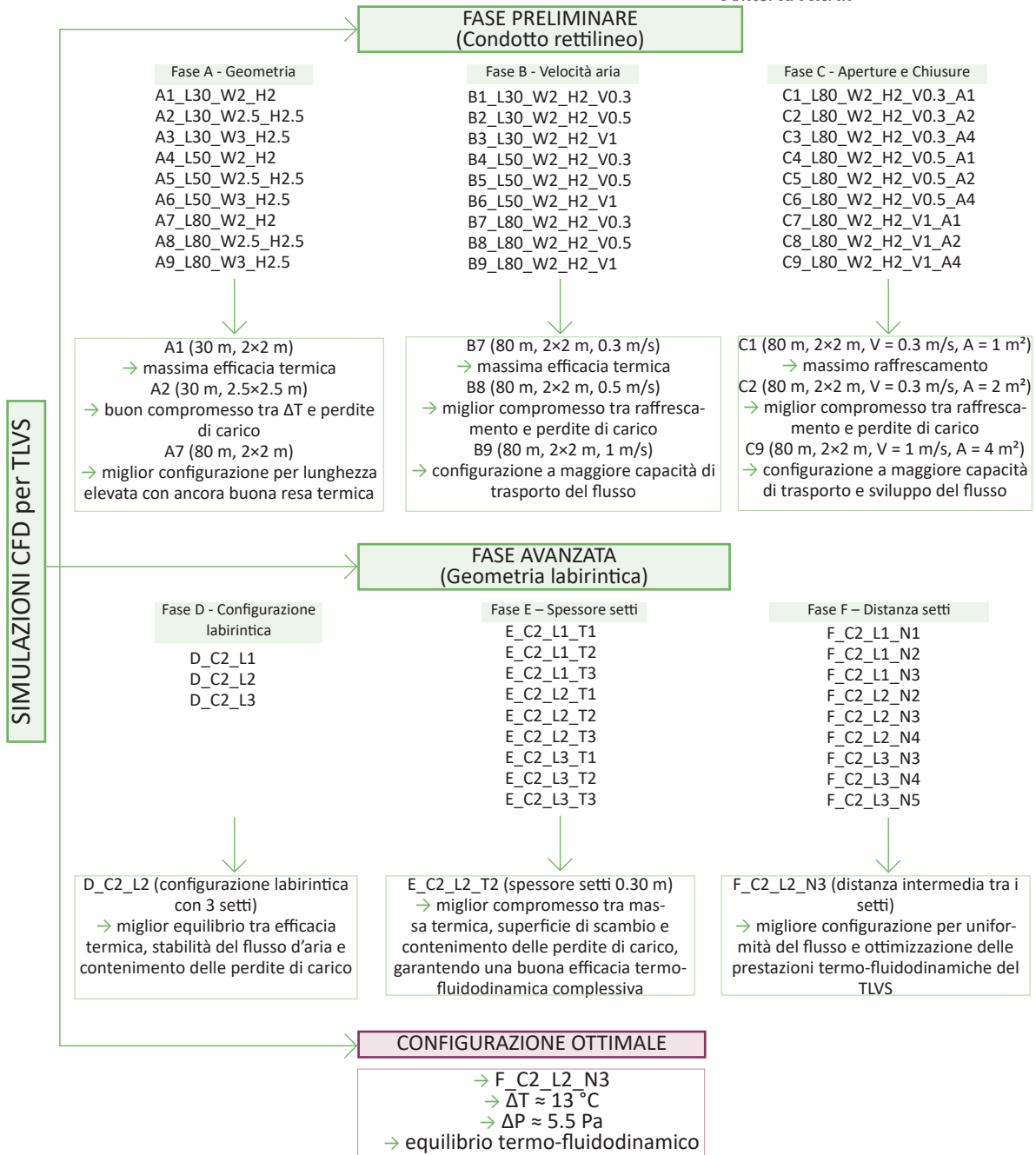
#### **Distribuzione della pressione e perdite di pressione ( $\Delta P$ ):**

Il comportamento della pressione è stato analizzato per valutare l'efficienza aerodinamica del sistema. Le configurazioni caratterizzate da eccessivi cali di pressione o forti perdite localizzate (ad esempio, in corrispondenza di bruschi cambi di direzione) sono state considerate meno ottimali, in quanto avrebbero aumentato l'energia necessaria per il movimento dell'aria e ridotto le prestazioni complessive del sistema. Il processo di selezione si è quindi basato su una valutazione equilibrata di questi parametri, evitando soluzioni che massimizzassero un aspetto (ad esempio,  $\Delta T$ ) a scapito di altri (ad esempio, perdite di pressione eccessive o condizioni di flusso instabili).

Questo processo di filtraggio iterativo ha portato all'integrazione dei parametri con le migliori prestazioni in una configurazione finale, identificata come F\_C2\_L2\_N3, che rappresenta l'equilibrio ottimale tra efficacia termica, stabilità del flusso d'aria ed efficienza aerodinamica.

*Tabella 6.17 Sintesi delle simulazioni TLVS, articolato per fasi di analisi (A-F), ed individuazione progressiva delle configurazioni ottimali.*

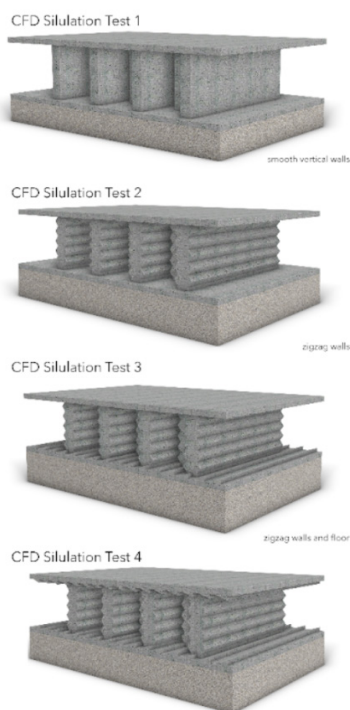
Fonte: K. Mitrik



## 6.12 Simulazioni CDF: Fase x\_influenza della morfologia delle superfici interne del sistema TLVS

**Figura 6.146** Configurazioni preliminari delle morfologie superficiali interne del TLVS per la valutazione dell'influenza geometrica sui processi di scambio termo-fluidodinamico e sulle prestazioni di raffrescamento passivo.

Fonte: K. Mitrik utilizzando il software di modellazione Rhinoceros.



Prima dell'avvio delle simulazioni articolate nelle sei fasi precedentemente descritte, è stata condotta un'indagine preliminare focalizzata sull'influenza della morfologia delle superfici interne del sistema TLVS, sviluppata nell'ambito di un contributo scientifico dedicato. Tale approfondimento ha consentito di definire un primo quadro metodologico e interpretativo relativo al ruolo della geometria superficiale nei processi di scambio termo-fluidodinamico, ponendo le basi per le successive analisi parametriche. In particolare, l'attenzione è stata rivolta alla configurazione tridimensionale delle superfici interne del condotto, intese come possibile variabile progettuale in grado di modificare sia la distribuzione del flusso sia i meccanismi di scambio termico. Sebbene tale linea di ricerca non sia stata ulteriormente sviluppata nelle fasi successive per motivi legati ai tempi di approfondimento, essa rappresenta un ambito di indagine di elevato interesse e potenziale applicativo, strettamente connesso ai risultati emersi nel presente lavoro.

Per la modellazione CFD del sistema TLVS è stata sviluppata una geometria di riferimento mediante il software Rhinoceros (Rhino), con dimensioni complessive pari a 10x15x3 m, successivamente implementata nel plugin Butterfly, integrato in Grasshopper e basato sul motore di calcolo OpenFOAM. Il workflow di simulazione è stato strutturato secondo una procedura consolidata in ambito CFD, articolata in quattro fasi principali:

- la definizione della geometria e delle condizioni al contorno (Geometry & Boundary Conditions),
- la generazione della mesh (Mesh Generation),
- l'impostazione e l'esecuzione del solutore (Solver Setup & Run);
- l'elaborazione e l'analisi dei risultati (Post-Processing).

Le condizioni al contorno sono state impostate in modo omogeneo per tutte le configurazioni:

- Pareti solide: temperatura costante pari a 14 °C, valore rappresentativo della temperatura media del terreno a una determinata profondità, coerente con l'ipotesi di accoppiamento termi-

co con il suolo.

- Ingresso del flusso d'aria (inflow): velocità uniforme pari a 0,3 m/s e temperatura di 20 °C, in linea con scenari tipici di ventilazione naturale estiva.
- Uscita del flusso (outflow): condizione di pressione atmosferica di riferimento.

La procedura di simulazione CFD descritta è stata applicata a quattro differenti varianti geometriche del sistema TLVS, concepite per valutare l'influenza della morfologia delle superfici interne sul comportamento termo-fluidodinamico del flusso d'aria. La prima configurazione è caratterizzata da superfici interne lisce; la seconda introduce pareti verticali con andamento "a zig-zag"; la terza estende la medesima geometria irregolare anche al pavimento; la quarta propone una configurazione completamente articolata, in cui l'andamento "a zig-zag" interessa pareti, pavimento e soffitto. La scelta di analizzare diverse morfologie superficiali si ispira ai risultati sperimentali di Rim et al. (2018), che evidenziano come superfici goffrate applicate al pavimento possano determinare significative variazioni nei gradienti termici e nei meccanismi di scambio convettivo.

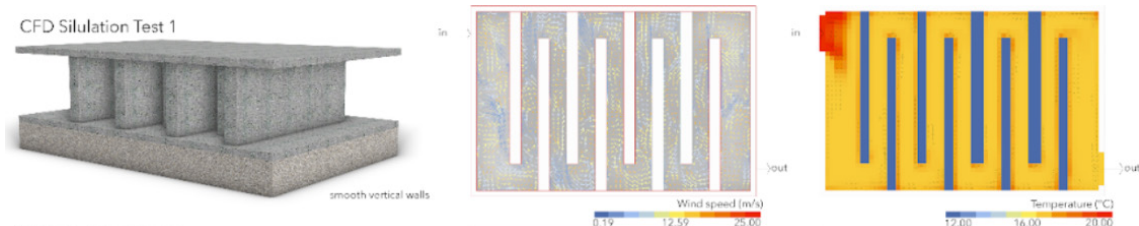
L'approccio comparativo adottato consente pertanto di isolare l'effetto geometrico quale variabile indipendente, mantenendo costanti tutte le altre condizioni di simulazione.

## Risultati

L'analisi CFD condotta sulle quattro configurazioni geometriche del TLVS consente di evidenziare in modo chiaro il ruolo determinante della morfologia interna nella modulazione dei campi fluidodinamici e termici. I risultati mostrano come la progressiva introduzione di irregolarità superficiali e di discontinuità geometriche non produca soltanto una variazione locale delle velocità, ma determini una modifica sostanziale del comportamento complessivo del sistema in termini di scambio termico e capacità di raffrescamento.

Nel Test 1, caratterizzato da pareti verticali lisce, il flusso d'aria mantiene un andamento prevalentemente laminare, con una distribuzione delle velocità relativamente uniforme lungo i canali. Le velocità minime registrate risultano contenute (circa 0,05 m/s), mentre i picchi massimi si attestano intorno ai 2,5 m/s. Questa configurazione, pur garantendo una circolazione regolare, non favorisce un significativo rimescolamento dell'aria né un'intensa interazione tra fluido e massa termica. Di conseguenza, il gradiente di temperatura

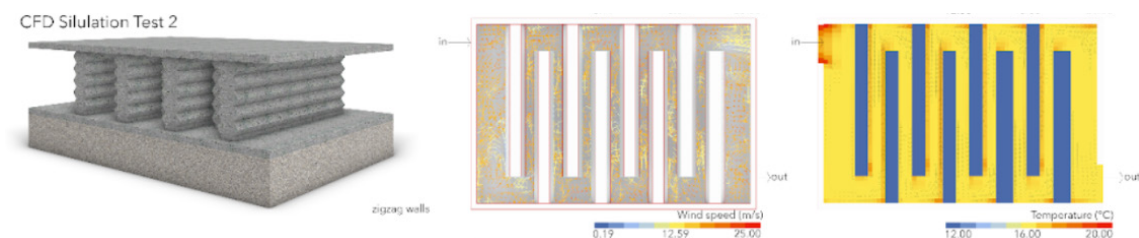
risulta limitato, con una riduzione complessiva  $\Delta T$  compresa tra  $-1$  °C e  $-2$  °C. Il comportamento osservato conferma che, in assenza di elementi di disturbo, lo scambio termico si basa principalmente sulla conduzione superficiale e su un moto convettivo moderato.



**Figura 6.147** Caso 1: configurazione con pareti verticali lisce in calcestruzzo a basse emissioni; distribuzione della velocità del vento (m/s) e della temperatura (°C) lungo il percorso di ventilazione.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Con l'introduzione delle pareti "a zig-zag" nel Test 2, il sistema subisce una prima trasformazione sostanziale. Le superfici irregolari generano micro-turbolenze e deviazioni locali del flusso che interrompono l'andamento lineare del moto, incrementando la miscelazione dell'aria. Le velocità locali aumentano fino a circa 5 m/s in corrispondenza delle strozzature e dei cambi di direzione, mentre le zone di ristagno si riducono sensibilmente. Questo incremento della turbolenza favorisce un maggiore scambio convettivo con la massa termica delle pareti, determinando una riduzione della temperatura più marcata, con  $\Delta T$  nell'ordine di  $-3/-4$  °C. Si osserva quindi un primo salto prestazionale legato esclusivamente alla modifica della geometria laterale.



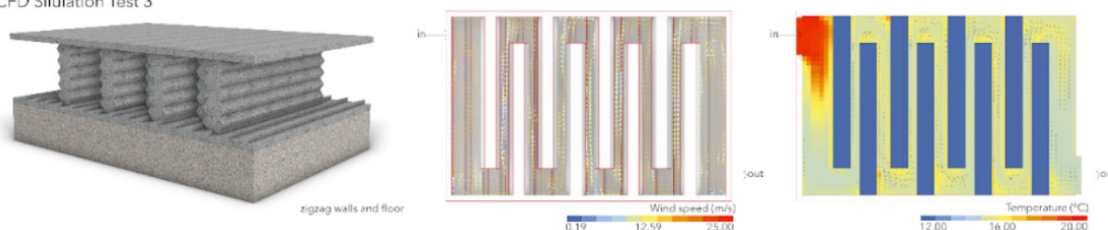
**Figura 6.148** Caso 2: configurazione con pareti verticali a zig-zag in calcestruzzo a bassa emissione; distribuzione della velocità del vento (m/s) e della temperatura (°C) lungo il percorso di ventilazione.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

Il Test 3, in cui la geometria gofrata viene estesa anche al pavimento, amplifica ulteriormente il fenomeno. L'interazione tra le superfici irregolari su più piani genera un aumento significativo della superficie di scambio e una distribuzione più omogenea delle turbolenze lungo l'intero percorso dell'aria. Le simulazioni evidenziano ampie zone con velocità comprese tra 2,5 e 5 m/s, accompagnate da una diminuzione più consistente della temperatura dell'aria in uscita. Il  $\Delta T$  medio si colloca infatti tra  $-4$  °C e  $-8$  °C, con una maggiore stabilità del raffrescamento lungo la sezione del labirinto. In questa configurazione, l'effetto combinato di incremento della su-

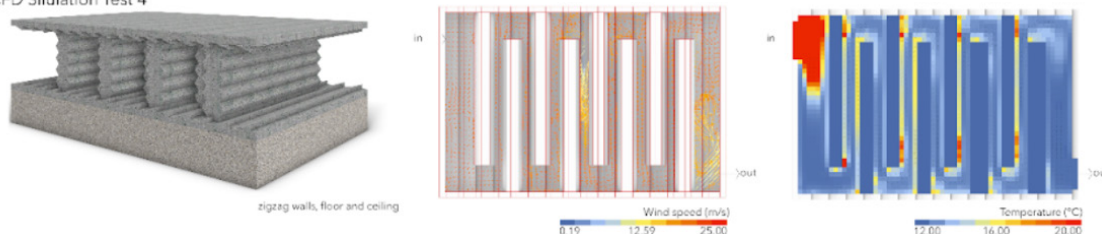
perficie attiva e di rimescolamento tridimensionale del flusso consentendo di sfruttare in modo più efficace l'inerzia termica della massa.

CFD Simulation Test 3



La configurazione più complessa, analizzata nel Test 4, integra la geometria "a zig-zag" su pareti, pavimento e soffitto. Tale soluzione rappresenta la massimizzazione del principio di disturbo controllato del flusso. Le simulazioni mostrano una ventilazione interna stabile con valori medi intorno a 4-5 m/s e una distribuzione delle velocità più uniforme lungo l'intero sviluppo del labirinto. L'intensificazione del rimescolamento favorisce un contatto più prolungato tra aria e superfici massicce, incrementando lo scambio termico convettivo. La riduzione della temperatura raggiunge valori compresi tra -6 °C e -8 °C, configurando la soluzione come la più performante tra quelle analizzate.

CFD Simulation Test 4



Nel confronto complessivo tra le quattro configurazioni emerge una relazione diretta tra complessità geometrica e prestazione termica. L'aumento delle discontinuità superficiali determina un progressivo incremento della turbolenza, della superficie di contatto e del tempo effettivo di permanenza dell'aria all'interno del sistema. Questo si traduce in un miglior rimescolamento del fluido e in una significativa diminuzione della temperatura di uscita, come evidenziato anche dall'andamento comparativo dei valori di velocità minima e  $\Delta T$  riportati nel grafico di sintesi.

Dal punto di vista progettuale, i risultati confermano che la sola massa termica non è sufficiente a garantire un raffrescamento efficace se non accompagnata da una configurazione geometrica capace di ottimizzare lo scambio convettivo. La geometria interna del TLVS

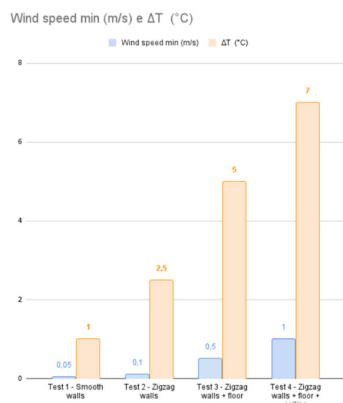
*Figura 6.149* Caso 3: configurazione con pareti a zig-zag e pavimento in calcestruzzo a basse emissioni; distribuzione della velocità del vento (m/s) e della temperatura (°C) lungo il percorso di ventilazione.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).

*Figura 6.150* Caso 4: configurazione con pareti, pavimento e soffitto a zig-zag in calcestruzzo a basse emissioni; distribuzione della velocità del vento (m/s) e della temperatura (°C) lungo il percorso di ventilazione.

Fonte: simulazioni CFD svolte da Mitrik K. ottenute utilizzando Butterfly nell'ambiente Ladybug Tools (un plugin per Rhinoceros).





**Grafico 6.5** Influenza della geometria del TLVS sulla velocità del vento, m/s, e sulla riduzione della temperatura,  $\Delta T$ . Fonte: K. Mitrik

assume pertanto un ruolo strategico, configurandosi non come elemento secondario, ma come variabile progettuale determinante per l'efficienza del sistema.

Alla luce dei risultati ottenuti, l'analisi della morfologia delle superfici interne si configura come un naturale sviluppo della ricerca, in grado di integrare e completare il quadro parametrico definito nelle fasi D, E e F.

Un'estensione futura dello studio potrebbe prevedere:

- l'introduzione combinata di morfologie superficiali e configurazioni labirintiche l'analisi dell'interazione tra:

distanza tra i setti

rugosità/morfologia delle superfici

la valutazione del rapporto tra:

- incremento dello scambio termico
- aumento delle perdite di carico

In questo contesto, la morfologia superficiale potrebbe essere interpretata come un parametro di ottimizzazione avanzata, capace di agire su scala locale all'interno di una geometria già ottimizzata a scala globale.

L'analisi della morfologia delle superfici interne, sebbene non approfondita in modo sistematico nel presente lavoro, costituisce un contributo metodologico significativo e pienamente coerente con l'impostazione della ricerca. Essa permette di estendere l'interpretazione del sistema TLVS, introducendo una variabile progettuale aggiuntiva che interviene non soltanto sulla configurazione geometrica complessiva, ma anche sulle caratteristiche qualitative delle superfici coinvolte nei processi di scambio. In questa prospettiva, il percorso sviluppato attraverso le sei fasi può essere letto come un processo di progressiva ottimizzazione della geometria a scala globale, mentre l'indagine sulla morfologia delle superfici si configura come un ulteriore livello di approfondimento, orientato al controllo più fine e puntuale dei fenomeni termo-fluidodinamici.

## 6.13 Configurazione ottimale del TLVS e integrazione nel sistema di ventilazione dell'edificio del caso pilota

Sulla base del confronto tra il fabbisogno di ventilazione degli ambienti principali (Capitolo 6, § 3.4) e la capacità prestazionale del sistema, il dimensionamento del TLVS può essere definito in modo coerente e progettualmente fondato.

Riprendiamo il fabbisogno di portata per ciascuna categoria funzionale risulta pari a:

- Aule didattiche: circa  $3.024 \text{ m}^3/\text{h}$
- Aula magna: circa  $1.037 \text{ m}^3/\text{h}$
- Uffici amministrativi e incubatori: circa  $2.040 \text{ m}^3/\text{h}$
- Laboratori: circa  $2.448 \text{ m}^3/\text{h}$
- Spazi comuni: circa  $3.352 \text{ m}^3/\text{h}$
- Spazi connettivi: circa  $550 \text{ m}^3/\text{h}$

La configurazione conclusivamente individuata come più equilibrata sotto il profilo termo-fluidodinamico è il caso F\_C2\_L2\_N3, che deriva dalla configurazione labirintica intermedia L2 ( $20 \times 8 \text{ m}$ ), con spessore dei setti pari a  $0,30 \text{ m}$  e distanza intermedia tra i setti, risultando la soluzione ottimale del percorso simulativo. Questa configurazione associa infatti una  $\Delta T$  di circa  $12,9\text{--}13,2 \text{ }^\circ\text{C}$  a perdite di carico ancora contenute, confermandosi come il miglior compromesso tra efficacia dello scambio e stabilità fluidodinamica. Per tradurre questo esito in una proposta progettuale concreta, si può assumere la relazione fluidodinamica di base:

$$Q_{\text{TLVS}} = A \cdot v \cdot 3600$$

dove  $A$  è l'area utile dell'apertura di ingresso del modulo e  $v$  la velocità media d'ingresso. La stessa formulazione è riportata nel testo metodologico di tesi come relazione di riferimento per la definizione della portata di simulazione. Assumendo, in continuità con il caso base C2, una velocità di ingresso pari a  $0,30 \text{ m/s}$  e considerando per il modulo ottimizzato F\_C2\_L2\_N3 un'apertura utile di ingresso pari a  $1,0 \text{ m}^2$ , la portata trattabile da un singolo modulo risulta:

$$Q_{TLVS}=1,0 \cdot 0,30 \cdot 3600=1080 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ne consegue che, per soddisfare la portata richiesta dagli ambienti principali del Rome Technopole, pari a circa  $8.550 \text{ m}^3/\text{h}$ , il numero teorico minimo di moduli necessari è:

$$N=8550/1080=7,92$$

ossia:

$$N \approx 8 \text{ moduli TLVS}$$

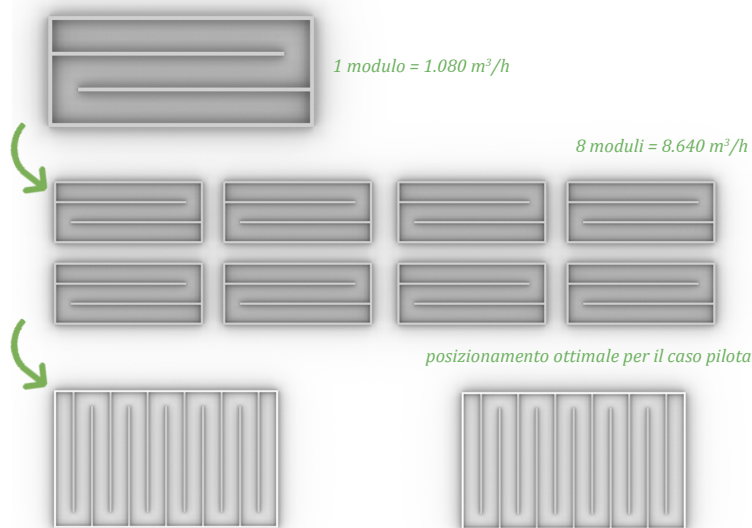
Un sistema composto da 8 moduli TLVS di tipo F\_C2\_L2\_N3 garantirebbe quindi una portata complessiva pari a:

$$Q_{\text{tot}}=8 \cdot 1080=8640 \text{ m}^3/\text{h}$$

valore leggermente superiore al fabbisogno stimato e pertanto adeguato a coprire il rinnovo d'aria degli ambienti principali dell'edificio. Tale soluzione presenta il vantaggio di mantenere ciascun modulo in un regime di funzionamento coerente con la configurazione ottimizzata emersa dalle simulazioni, evitando di sovraccaricare un singolo condotto con portate e velocità superiori a quelle verificate numericamente.

Ne deriva che, nel caso del Rome Technopole, il TLVS può essere ragionevolmente configurato come un sistema modulare distribuito, costituito da più rami paralleli, in grado di garantire il rinnovo d'aria richiesto mantenendo condizioni di funzionamento coerenti

*Figura 6.151 Configurazione planimetrica degli 8 moduli TLVS.  
Fonte: K. Mitrik utilizzando il software di modellazione Rhinoceros.*



Il sistema TLVS, concepito come configurazione modulare distribuita, garantisce condizioni operative coerenti con le simulazioni CFD, mantenendo adeguati livelli di rinnovo dell'aria senza incrementare le perdite di carico. Integrabile nella strategia bioclimatica dell'edificio, il sistema può essere adattato in numero e disposizione in funzione dell'organizzazione spaziale e delle strategie di ventilazione naturale. Il suo dimensionamento, basato sul fabbisogno di ventilazione degli ambienti, collega direttamente le prestazioni termofluidodinamiche del TLVS alla riduzione del fabbisogno energetico, attraverso il pre-trattamento passivo dell'aria esterna e la diminuzione dei carichi termici sensibili legati alla ventilazione.

Assumendo come riferimento la configurazione ottimale individuata nelle simulazioni, corrispondente al caso F\_C2\_L2\_N3, il sistema è in grado di garantire una riduzione della temperatura dell'aria in ingresso agli ambienti pari a circa  $\Delta T \approx 12-13$  °C. Applicando tale variazione termica alla portata complessiva richiesta dagli ambienti principali del Rome Technopole, pari a circa 8.550 m<sup>3</sup>/h, è possibile stimare il contributo del TLVS in termini di potenza termica sottratta al sistema edificio. Il raffrescamento sensibile fornito dal TLVS può essere espresso mediante la relazione:

$$\dot{Q} = \rho \cdot c_p \cdot Q \cdot \Delta T$$

dove:

$\rho$  è la densità dell'aria ( $\approx 1,2$  kg/m<sup>3</sup>),  
 $c_p$  è il calore specifico dell'aria ( $\approx 1000$  J/kgK),  
 $Q$  è la portata volumetrica (m<sup>3</sup>/s),  
 $\Delta T$  è la variazione di temperatura (K).

Convertendo la portata:

$$Q = 8550 \text{ m}^3/\text{h} = 2,375 \text{ m}^3/\text{s}$$

si ottiene:

$$\dot{Q} = 1,2 \cdot 1000 \cdot 2,375 \cdot 13 \approx 37.050 \text{ W}$$

$$\approx 37 \text{ kW}$$

Questo valore rappresenta la potenza frigorifera equivalente fornita passivamente dal TLVS nelle condizioni di progetto, ovvero il carico termico che non deve essere coperto da sistemi impiantistici attivi. Dal punto di vista energetico, ciò si traduce in una riduzione diretta del fabbisogno di raffrescamento estivo, con benefici sia in termini di consumo energetico sia di dimensionamento degli impianti. In

particolare, il TLVS consente di:

- ridurre la temperatura dell'aria di rinnovo prima dell'immissione negli ambienti;
- abbattere i picchi di carico termico;
- diminuire il funzionamento dei sistemi HVAC attivi;
- migliorare l'efficienza complessiva dell'edificio.

È tuttavia importante sottolineare che il contributo del TLVS non copre l'intero fabbisogno di raffrescamento dell'edificio, ma si configura come un sistema di pre-condizionamento passivo, la cui efficacia dipende dalle condizioni climatiche, dalla continuità di funzionamento e dall'integrazione con altre strategie bioclimatiche e impiantistiche. In assenza di un calcolo energetico dettagliato, è possibile fare riferimento a valori tipici per edifici terziari ad uso misto (didattico, uffici e laboratori), generalmente compresi tra 40 e 70 W/m<sup>2</sup>. Considerando una superficie utile pari a circa 2.355 m<sup>2</sup>, il fabbisogno di raffrescamento estivo dell'edificio può essere stimato in un intervallo compreso tra:

100 kW e 165 kW

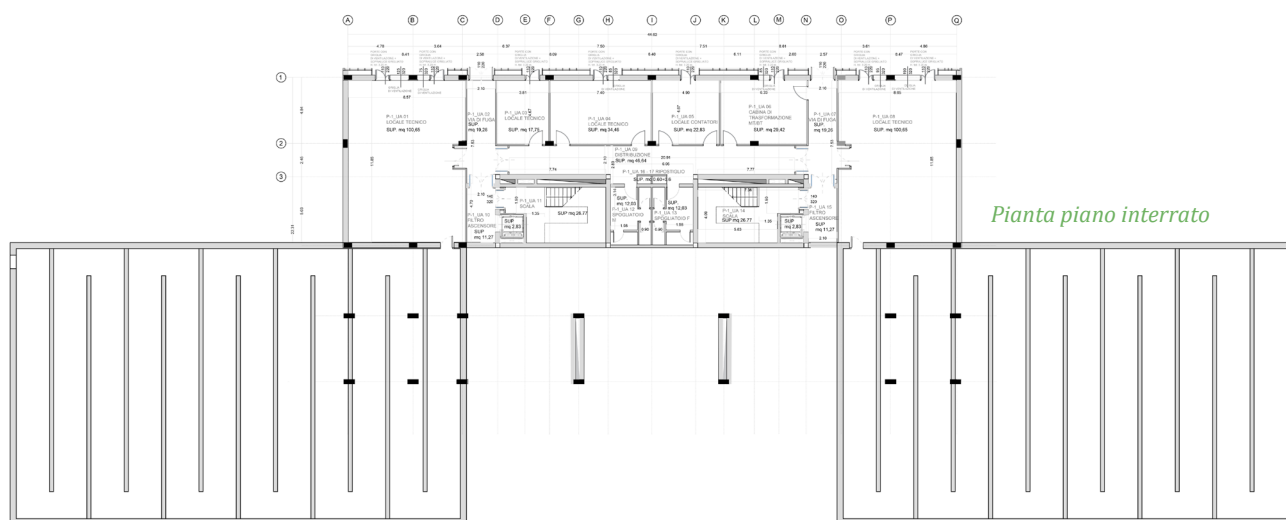
Il confronto tra la potenza fornita dal TLVS e il fabbisogno complessivo consente di quantificare la riduzione dei carichi termici sensibili associati alla ventilazione. In particolare, il sistema risulta in grado di coprire una quota compresa tra circa il 20% e il 35% del fabbisogno di raffrescamento estivo, con valori medi attestabili nell'intervallo 25-30%.

Tale risultato evidenzia il ruolo del TLVS come sistema efficace di pre-condizionamento passivo dell'aria, capace di ridurre in modo significativo i carichi energetici dell'edificio e di contribuire al contenimento dei consumi. È tuttavia opportuno sottolineare come il TLVS non sia progettato per sostituire integralmente i sistemi di climatizzazione attiva, ma per operare in sinergia con essi, riducendo la domanda energetica alla fonte e migliorando le condizioni di ingresso dell'aria negli ambienti interni.

Nel caso del Rome Technopole, questo contributo assume particolare rilevanza in quanto si inserisce all'interno di una strategia bioclimatica integrata, che include ulteriori dispositivi passivi quali torri di ventilazione, laghi d'aria e sistemi di facciata. In tale contesto, il TLVS contribuisce alla definizione di un modello energetico basato sulla riduzione dei carichi piuttosto che sulla loro compensazione, configurandosi come elemento chiave per il miglioramento delle prestazioni ambientali complessive dell'edificio.

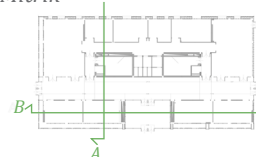
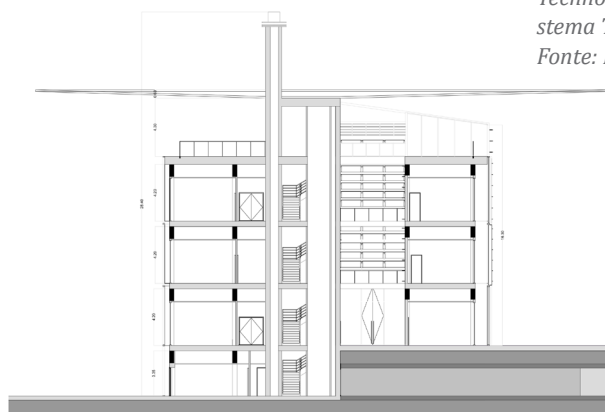
*Figura 6.152* Pianta piano interrato con l'integrazione del TLVS, organizzati in quattro unità sul lato destro e quattro sul lato sinistro, a definire la logica compositiva e l'articolazione spaziale del sistema.

Fonte: K. Mitrik



*Figura 6.153* Sezioni longitudinale e trasversale del caso studio Rome Technopole con integrazione del sistema TLVS nel livello sotterraneo.

Fonte: K. Mitrik



*A-A' Sezione trasversale*

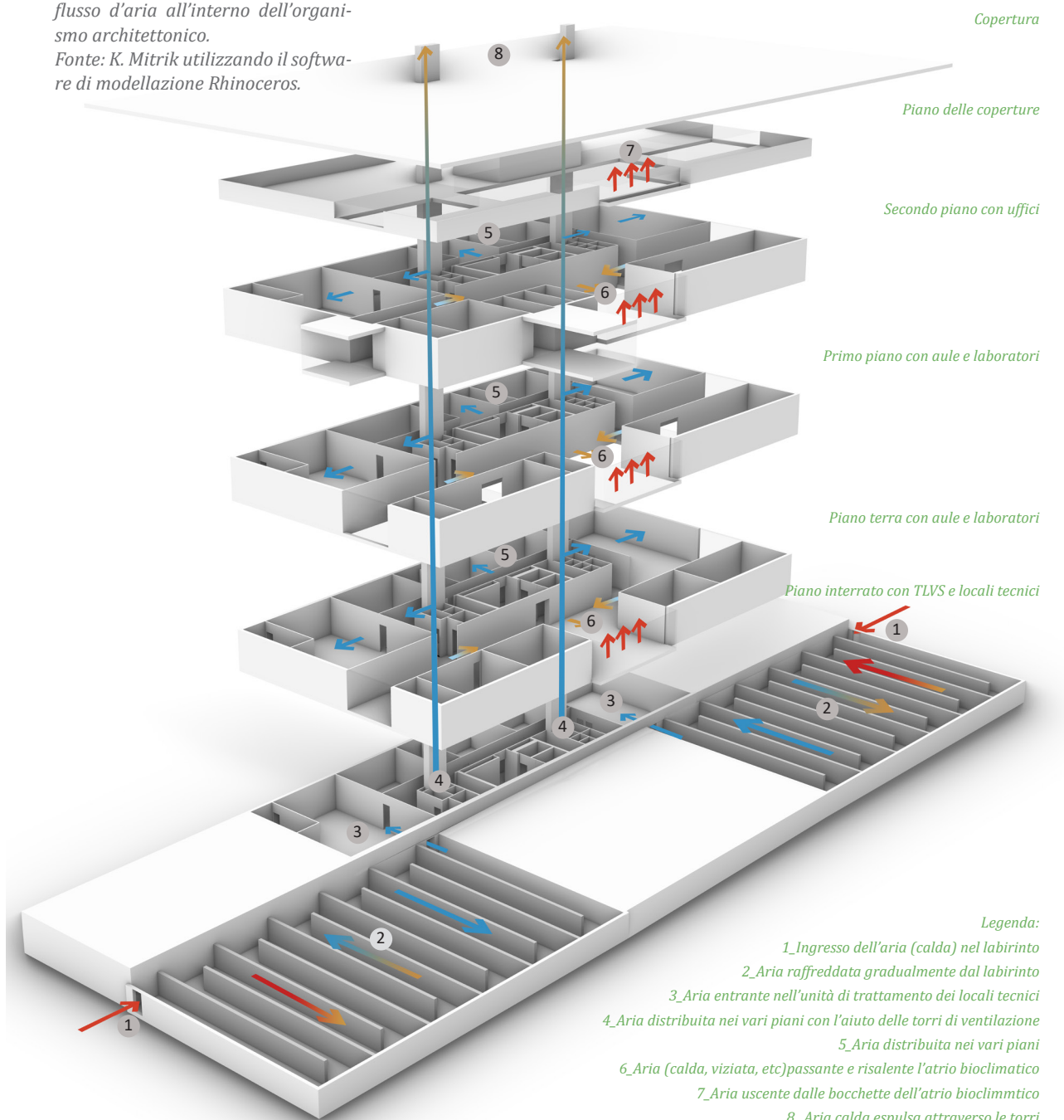


*B-B' Sezione longitudinale*



**Figura 6.154** Esploso assonometrico del caso pilota con integrazione del sistema TLVS. L'illustrazione descrive il funzionamento del sistema di ventilazione passiva e il movimento del flusso d'aria all'interno dell'organismo architettonico.

Fonte: K. Mitrik utilizzando il software di modellazione Rhinoceros.



## References

- Copernicus. (2024). European State of the Climate | Copernicus. <https://climate.copernicus.eu/ESOTC>
- ISPRA. (2025). Ambiente in Italia: Uno sguardo d'insieme—Annuario dei dati ambientali 2024. Edizione 2024. ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/pubblicazioni-di-pregio/atlante-dei-dati-ambientali-edizione-2024>
- Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., & Valente, R. (2020). Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale—Adapting to the changing climate. Knowledge innovation for environmental design. Ediz. Bilingue. Maggioli Editore.
- make. (2025, marzo 10). Exploring Thermal Labyrinth Ventilation Systems at the Big Data Institute, University of Oxford. Make Architects. <https://www.makearchitects.com/thinking/exploring-thermal-labyrinth-ventilation-systems-big-data-institute-university-of-oxford/>
- Meteostat. (2025). Climate data for Rome Ciampino Airport (LIRA). Meteostat Climate Database. <https://meteostat.net/en/station/16239?t=2025-08-13/2025-08-20>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- PVGIS. (2024). JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)—European Commission—(PVGIS v5.3). PVGIS – European Commission, Joint Research Centre. <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg-tools/en/>
- Rim, M., Sung, U.-J., & Kim, T. (2018). Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption. *Energies*, 11(10), 2762. <https://doi.org/10.3390/en11102762>
- Tucci, F. (2014). Involucro, clima, energia: Qualità bioclimatica ed efficienza energetica in architettura nel progetto tecnologico ambientale della pelle degli edifici = Envelope, climate, energy: bioclimatic quality and energy efficiency in architecture in the environmental technological design of building skins. Altralinea edizioni.
- WMO. (2024). State of the Global Climate 2023. <https://library.wmo.int/records/item/68835-state-of-the-global-climate-2023>



PARTE IV

# CONCLUSIONI



## CAPITOLO 7 Conclusioni, output della ricerca e prospettive future





## 7.1 Conclusioni e output della ricerca

La ricerca sviluppata ha consentito di affrontare in modo articolato e consapevole il tema del raffrescamento passivo nel settore terziario, collocandolo all'interno delle più ampie sfide legate alla transizione energetica e alla crisi climatica. In un contesto in cui la domanda di raffrescamento è destinata ad aumentare in modo significativo, il lavoro ha indagato il ruolo della ventilazione naturale come strategia attiva di progetto, individuando nel Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) un dispositivo capace di incidere concretamente sulla riduzione preventiva dei carichi energetici.

L'impostazione metodologica adottata, strutturata in fasi progressive e interconnesse, ha permesso di costruire un percorso coerente che dalla riflessione teorica conduce alla verifica applicativa. Questo passaggio risulta particolarmente rilevante, poiché consente di superare una visione astratta del sistema e di tradurre le conoscenze acquisite in strumenti operativi per il progetto. In questo senso, il confronto con un caso reale, quale il Rome Technopole, ha rappresentato un momento decisivo, permettendo di verificare la coerenza tra prestazioni simulate, fabbisogni dell'edificio e scelte progettuali. I risultati ottenuti confermano la validità dell'ipotesi iniziale: il TLVS si configura come un sistema efficace, tecnicamente fattibile e potenzialmente replicabile nel contesto climatico mediterraneo. Le simulazioni termo-fluidodinamiche hanno evidenziato una capacità significativa di attenuare i picchi termici estivi e di ridurre i carichi di raffrescamento, con un contributo stimabile nell'ordine del 25-30% del fabbisogno energetico estivo. Questo dato, pur derivante da una modellazione controllata, evidenzia il ruolo del TLVS come sistema di pre-trattamento passivo dell'aria, in grado di ridurre la domanda energetica alla fonte piuttosto che limitarne gli effetti.

Un elemento centrale emerso riguarda la natura intrinsecamente parametrica del sistema. Le prestazioni del TLVS non dipendono da un singolo fattore, ma dall'interazione tra geometria del labirinto, proprietà dei materiali, condizioni climatiche e modalità di utilizzo

degli spazi. Ne deriva la necessità di un approccio progettuale integrato e site-specific, in cui il sistema venga calibrato in relazione al contesto, evitando soluzioni standardizzate e favorendo invece strategie adattive.

In questo contesto, uno dei principali contributi della ricerca consiste nella definizione di un sistema organico di strumenti progettuali, accompagnato da una serie di risultati organizzati e coerenti:

- Le schede dei sistemi bioclimatici hanno consentito di analizzare e sistematizzare le principali strategie ambientali, evidenziando soluzioni progettuali ricorrenti e prestazioni in relazione ai diversi contesti climatici;
- Le schede dei casi studio e la matrice comparativa hanno consentito di organizzare e interpretare esperienze internazionali, individuando pattern progettuali e criticità ricorrenti;
- Le schede tecniche dei componenti hanno invece tradotto i requisiti prestazionali in soluzioni costruttive concrete, facilitando il passaggio dalla teoria alla pratica;
- I modelli simulativi hanno permesso di verificare e ottimizzare il comportamento del sistema, rafforzandone la validità applicativa e Linee guida progettuali.

Nel loro insieme, tali output, configurano un sistema integrato di strumenti progettuali, capace di supportare l'integrazione del TLVS nei processi di progettazione architettonica.

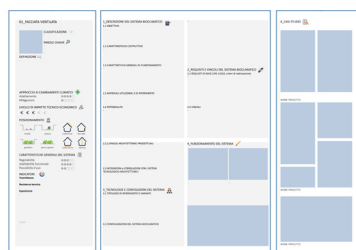
Permangono tuttavia alcune criticità, legate alla:

- prevalenza di simulazioni rispetto a monitoraggi reali;
- limitata validazione a lungo termine;
- complessità dei fenomeni igrotermici;
- necessità di approfondimenti economici su scala reale.

Tali limiti non riducono il valore dei risultati ottenuti, ma evidenziano la necessità di ulteriori approfondimenti. La ricerca dimostra come il TLVS possa essere interpretato non solo come un dispositivo tecnologico, ma come una vera e propria infrastruttura ambientale integrata, capace di contribuire alla riduzione dei consumi energetici e alla resilienza climatica degli edifici. L'approccio metodologico adottato, fondato sull'integrazione tra analisi, sistematizzazione e simulazione, offre strumenti concreti per una progettazione più consapevole, adattiva e orientata alla decarbonizzazione del costruito.

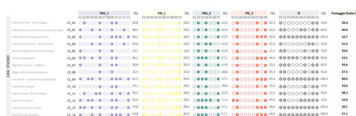
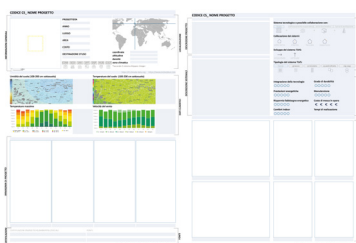
### Sistemi bioclimatici

Questa raccolta di schede tecniche mira a fornire una panoramica concisa ed esauriente dei diversi tipi di sistemi tecnologici utilizzati in vari contesti. L'insieme dei sistemi in esame è suddiviso in 4 macro-famiglie, ciascuna delle quali comprende categorie più specifiche. Questa suddivisione consente di raggruppare i sistemi in base a caratteristiche e funzioni comuni, facilitandone la comprensione e l'analisi. Ogni macro-famiglia comprende sistemi simili, offrendo una panoramica coerente e strutturata.



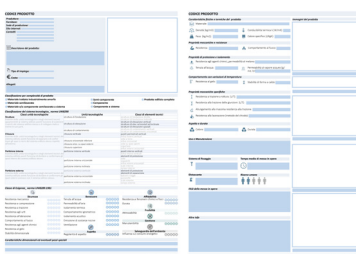
### Casi studio

I casi studio consentono la costruzione di un catalogo di tecnologie, materiali e componenti per il TLVS, a supporto della progettazione prestazionale e della valutazione economica degli interventi. L'analisi comparativa individua criteri per l'ottimizzazione delle soluzioni tecnologiche, contribuendo allo sviluppo di edifici più efficienti e resilienti, in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione. I risultati favoriscono la collaborazione multidisciplinare e rafforzano la competitività delle aziende, promuovendo la diffusione di soluzioni sostenibili. Inoltre, costituiscono la base per una piattaforma di supporto alla progettazione, utile ai professionisti per l'applicazione di strategie bioclimatiche.



### Analisi di mercato - Prodotto

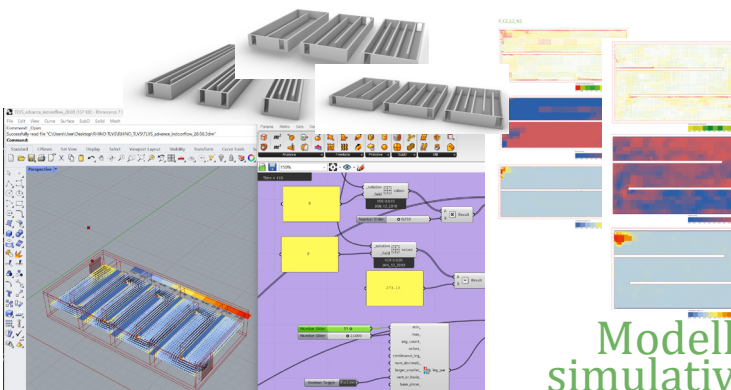
Un'ampia ricerca di mercato mira a preparare le tecnologie alla commercializzazione, ponendo le basi per il successivo utilizzo diffuso di questi prodotti. Ci aspettiamo che questo processo generi nuove soluzioni innovative e prototipi avanzati, in grado di rispondere alle sfide del mercato. Si prevede inoltre che favorisca la collaborazione tra diverse discipline e settori, promuovendo lo scambio di conoscenze e l'integrazione di approcci multidisciplinari. Questo sforzo dovrebbe portare a una maggiore competitività delle aziende e a una migliore preparazione delle tecnologie per l'adozione su larga scala, contribuendo così allo sviluppo economico e sociale.



x1 per ogni gruppo

### Modelli simulativi

I modelli simulativi hanno prodotto un output strutturato a supporto della progettazione del TLVS, consentendo di definire in modo parametrico le relazioni tra geometria, condizioni operative e prestazioni.



Modelli  
simulativi

## 7.2 Prospettive future di ricerca

Alla luce dei risultati ottenuti, emergono diverse linee di sviluppo volte ad approfondire e consolidare le conoscenze sul comportamento termo-fluidodinamico del sistema TLVS.

- Una prima direzione riguarda la validazione sperimentale, attraverso **l'implementazione del sistema in edifici reali e l'avvio di campagne di monitoraggio a lungo termine**, finalizzate a verificare le prestazioni in condizioni operative effettive e a valutare in modo integrato il comfort termo-igrometrico e la qualità dell'aria indoor, nonché la riduzione del fabbisogno energetico.
- Un ambito di ricerca altrettanto rilevante concerne l'estensione e il perfezionamento delle simulazioni numeriche, sia mediante una revisione critica dei modelli sviluppati, sia attraverso l'introduzione di un insieme più ampio e articolato di parametri. In questa prospettiva, risulta significativo ampliare il dominio di analisi oltre gli intervalli discreti finora considerati, esplorando range più estesi e continui di lunghezza del condotto, non limitati ai valori di 30, 50 e 80 m, ma comprendenti configurazioni intermedie e superiori, al fine di individuare eventuali soglie di saturazione dello scambio termico e condizioni di ottimo globale. Parallelamente, potranno essere approfonditi ulteriori parametri geometrici e fisici, quali la variabilità della sezione dei canali, la distribuzione non uniforme dei setti, l'interazione tra distanza e spessore degli ele-

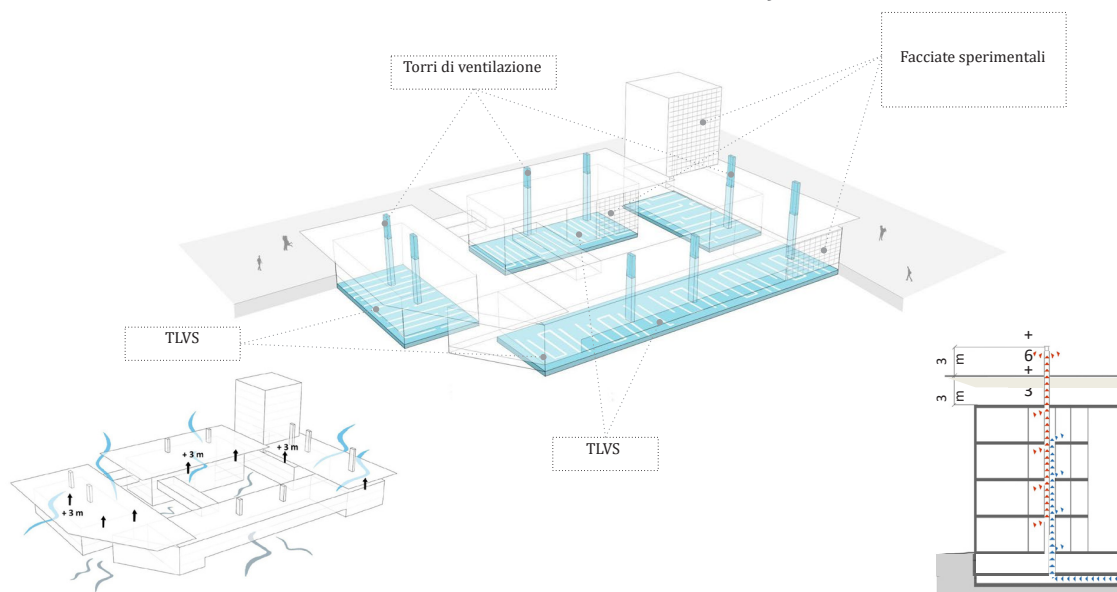
menti interni e l'introduzione di configurazioni ibride o non regolari. A ciò si affianca lo studio dell'influenza delle proprietà termo-fisiche dei materiali, considerando soluzioni con maggiore capacità termica o conducibilità variabile, in grado di incidere sui meccanismi di accumulo e rilascio del calore. Questo approccio consentirebbe di superare i limiti dell'impostazione attuale e di analizzare in modo più realistico i fenomeni transitori, il comportamento del sistema nel tempo e la sua capacità di adattamento.

In questo contesto, l'impiego di modelli CFD più avanzati, eventualmente integrati con strumenti di simulazione energetica, permetterebbe di ottenere una rappresentazione più completa e affidabile del sistema in condizioni reali.

- In una prospettiva più ampia, il TLVS può essere interpretato come parte di un sistema bioclimatico integrato, come nel caso del progetto Rome Technopole, in cui dispositivi quali torri di ventilazione e facciate sperimentali concorrono in modo sinergico alla regolazione del microclima e alla gestione dei flussi energetici.

La possibilità di distribuire più sistemi TLVS all'interno dello stesso organismo edilizio consente di costruire una rete di ventilazione passiva articolata, capace di adattarsi alle diverse condizioni spa-

*Figura 7.1 Schema integrato del sistema di ventilazione passiva dell'edificio, con evidenziazione del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) interrato, delle torri di ventilazione e delle facciate sperimentali, e rappresentazione dei principali flussi d'aria tra sottosuolo e ambienti interni. Fonte: Fondazione Rome Technopole, Rome Technopole Headquarter – Relazione Tecnica Generale, Sapienza Università di Roma, febbraio 2024.*





ziali e climatiche. Un ulteriore riferimento progettuale significativo è rappresentato dall'esperienza del Federation Square, in cui superfici tecniche e sistemi integrati assumono un ruolo attivo nella regolazione ambientale degli spazi, combinando funzioni di controllo luminoso, acustico e fluidodinamico. Questo approccio evidenzia come la progettazione delle superfici possa evolvere da elemento puramente formale a componente performativo, suggerendo possibili sviluppi del TLVS verso una maggiore integrazione con sistemi architettonici superficiali e dispositivi ambientali avanzati.

A una scala più ampia, si apre inoltre la possibilità di estendere l'applicazione del TLVS al livello urbano, integrandolo nei processi di rigenerazione sostenibile e nelle strategie di mitigazione delle isole di calore, contribuendo alla resilienza ambientale degli insediamenti. Infine, risultano fondamentali ulteriori analisi di tipo economico e ambientale, condotte mediante metodologie di Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Cost (LCC), al fine di valutare in modo completo i benefici del sistema lungo l'intero ciclo di vita e supportarne una diffusione consapevole e su larga scala.

## APPENDICE

# SCHEDA TIPO SISTEMI BIOCLIMATICI

## Appendice A

### RACCOLTA DI SCHEDE DEI SISTEMI TECNOLOGICI E CASI STUDIO INNOVATIVI

Questa raccolta di schede ha lo scopo di fornire una panoramica concisa e informativa su diverse tipologie di sistemi tecnologici utilizzati in vari contesti. Ogni scheda include una descrizione essenziale del sistema, delle sue caratteristiche principali, dei suoi obiettivi e delle sue applicazioni.

#### 1\_SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO PASSIVO

- 01\_Facciata ventilata
- 02\_Copertura ventilata
- 03\_Pareti/facciate verdi
- 04\_Coperture verdi (intensive ed estensive)
- 05\_Torri di ventilazione
- 06\_Laghi/Labirinti d'aria
- 07\_Muro traspirante
- 08\_Termo-rivestimenti con pitture e malte nanotecnologiche

#### 2\_SISTEMI A GUADAGNO SOLARE

Diretto:

- 01\_Atrio bioclimatico
- 02\_Muro Trombe-Michelle
- 03\_Sistema Barra-Costantini
- 04\_Muro d'acqua(interno)
- 05\_Aree buffer

Indiretto:

- 01\_Muro solare passivo
- 02\_Copertura ad acqua
- 03\_Serra solare

#### 3\_SISTEMI DI OMBREGGIAMENTO

- 01\_Sistema a isolamento trasparente (T.I.M.)
- 02\_Vetri a controllo solare: a basso fattore solare e selettivi
- 03\_Materiali termocromici/selettivi
- 04\_Schermature solari/frangisole
- 05\_Pergolati
- 06\_Sistemi smart di ombreggiamento con materiali a cambiamento di forma

#### 4\_SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO

- 01\_Letto/muro di roccia/pietre
- 02\_Sistema a grande massa termica
- 03\_Soffitta nera
- 04\_Sistema a cambiamento di fase(P.C.M.)
- 05\_Sistema a barriere

#### CODICE SISTEMA

CLASSIFICAZIONE   
-  
PAROLE CHIAVE   
-  
DEFINIZIONE   
-

APPROCCIO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI   
Adattamento   
Mitigazione 

LIVELLO DI IMPATTO TECNICO-ECONOMICO   
€ € € € €

POSIZIONAMENTO 



CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA   
Regolabilità   
Adattabilità funzionale   
Flessibilità d'uso 

INDICATORI 

Trasmittanza  
-  
Resistenza termica  
-  
Esposizione  
-

FONTI:

-  
-

1\_DESCRIZIONE DEL SISTEMA BIOCLIMATICO



1.1 OBIETTIVO

1.2 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

1.3 CARATTERISTICHE GENERALI DI FUNZIONAMENTO

1.5 MATERIALI UTILIZZABILI E DI RIFERIMENTO

1.6 POTENZIALITA

2.2.1.VINCOLI ARCHITETTONICI PROGETTUALI

2.3 INTERAZIONI e CORRELAZIONI CON I SISTEMI  
TECNOLOGICO-ARCHITETTONICI

3\_TECNOLOGIE E CONFIGUZIONI DEL SISTEMA



3.1 TIPOLOGIE DI RIFERIMENTO E VARIANTI

3.2 CONFIGURAZIONI DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

2\_REQUISITI E VINCOLI DEL SISTEMA BIOCLIMATICO



2.1 REQUISITI DI BASE (UNI 11018, criteri di realizzazione)

2.2 VINCOLI

4\_FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA



6\_CASI STUDIO



NOME PROGETTO

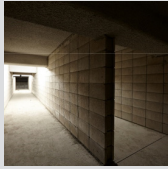
NOME PROGETTO

NOME PROGETTO

# ESEMPI DI SISTEMI BIOCLIMATICI

## Appendice A1\_Famiglia dei SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO PASSIVO

### 06\_LAGO/LABIRINTO D'ARIA



**CLASSIFICAZIONE**  
Sistema di raffreddamento passivo

**PAROLE CHIAVE**  
-Thermal  
-Flusso  
-Ipogeo

Labyrinth  
d'aria

#### DEFINIZIONE

Il labirinto termico è un sistema di ventilazione che aspira l'aria esterna attraverso una struttura sotterranea in cemento a forma di labirinto che fa parte dell'edificio stesso. Attraverso lo scambio di calore con il terreno, questo sistema può pre-raffreddare e pre-riscaldare l'aria esterna rispettivamente in estate e in inverno.

#### APPROCCIO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Adattamento  
Mitigazione



#### LIVELLO DI IMPATTO TECNICO-ECONOMICO

€ € € € €

#### POSIZIONAMENTO



#### CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA

Regolabilità  
Adattabilità funzionale  
Flessibilità d'uso



#### INDICATORI

Trasmissione  
Resistenza termica  
Sfasamento  
Fattore di attenuazione  
Conducibilità termica  
Esposizione

#### FONTI:

-Il retrofitting tecnologico, energetico e bioclimatico nell'edilizia tecnologica e soluzioni tecniche per il miglioramento della prestazione energetico-ambientale degli edifici, D. D'Olimpio, 2023.  
-Il raffreddamento passivo degli edifici in zone a clima temperato, Mario Grosso, II edizione, 2008.  
-Atlante dei sistemi tecnologici per l'architettura bioclimatica: Raffrescamento passivo in architettura /Atlas of technological systems for bioclimatic architecture: Passive cooling in architecture, F. Tucci; 2020.  
-Song, Seung-Yeong, Jin-Hee Song, e Jae-Han Lim. «Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy: A case study of an educational facility in South Korea». Energy for Sustainable Development 23 (1 dicembre 2014): 150-64.  
-Rim, Minyeop, Uk-Joo Sung, e Taeyeon Kim. «Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption». Energies 11 (15 ottobre 2018): 2762.

### DESCRIZIONE DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

#### 1.1 OBIETTIVO

**Ventilazione e climatizzazione:** controllo della temperatura, rimozione dell'umidità, qualità dell'aria.

**Risparmio energetico:** sfruttamento dell'energia geotermica e ventilazione naturale.

#### 1.2 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

##### Materiali:

**Struttura:** La scelta dei materiali per la struttura portante del labirinto dipende da vari fattori, come la profondità del labirinto (se sotterraneo), la campata richiesta, il carico previsto e le condizioni del terreno. Materiali comuni includono calcestruzzo armato, acciaio e legno trattato.

**Pareti e soffitti:** Le pareti e i soffitti del labirinto possono essere realizzati con una varietà di materiali, tra cui calcestruzzo, mattoni, blocchi di cemento, pannelli in gesso rivestito e persino materiali trasparenti come il policarbonato.

**Condotti d'aria:** I condotti d'aria, che veicolano il flusso d'aria all'interno del labirinto, possono essere realizzati in lamiera metallica, plastica o materiali compositi. La dimensione e la forma dei condotti dipendono dalla portata d'aria richiesta e dalla configurazione del labirinto.

##### Design:

**Layout:** Il layout del labirinto è fondamentale per il suo funzionamento. Fattori da considerare includono la forma generale del labirinto, la dimensione e la disposizione dei passaggi, la presenza di curve e intersezioni e la posizione delle entrate e delle uscite.

**Pendenza:** In un labirinto d'aria sotterraneo, è importante creare una pendenza graduale per facilitare il flusso d'aria naturale e prevenire il ristagno di acqua o detriti.

##### Sicurezza:

**Uscita di emergenza:** È fondamentale garantire vie di fuga sicure e ben indicate in caso di emergenza.

**Illuminazione:** Un'illuminazione adeguata è importante per la sicurezza dei visitatori e per il personale di manutenzione.

**Segnali e segnaletica:** Segnali chiari e visibili devono essere utilizzati per guidare i visitatori all'interno del labirinto e per indicare le uscite di emergenza.

**Distribuzione dell'aria fresca:** L'aria fresca e raffreddata viene distribuita all'interno dell'edificio attraverso bocchette posizionate strategicamente.

**Uscita dell'aria calda:** L'aria calda e stagnante all'interno dell'edificio viene espulsa attraverso aperture poste nella parte superiore dell'edificio.

### 2. REQUISITI/VINCOLI DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

#### 2.1 REQUISITI DI BASE

1. Permeabilità al vapore acqueo
2. Resistenza all'acqua liquida
3. Isolamento termico:
4. Resistenza meccanica
5. Durata nel tempo
6. Ecocompatibilità
7. Estetica

#### 2.2.1. VINCOLI ARCHITETTONICI PROGETTUALI

##### Spazio disponibile:

Il labirinto termico necessita di uno spazio sufficiente nel sottosuolo dell'edificio per ospitare i canali sotterranei. La dimensione del labirinto deve essere compatibile con la superficie disponibile del terreno e con le caratteristiche dell'edificio.

##### Tipologia di terreno:

Il tipo di terreno influenza la scelta dei materiali da utilizzare per i canali sotterranei e la profondità ottimale dei canali. Terreni sabbiosi o ghiaiosi permettono di realizzare canali meno profondi rispetto a terreni argillosi o compatti. È importante eseguire un'analisi del terreno prima di iniziare la progettazione del labirinto termico.

##### Caratteristiche dell'edificio:

La forma e l'orientamento dell'edificio possono influenzare il flusso d'aria naturale all'interno del labirinto termico. È importante posizionare le aperture di ingresso e uscita dell'aria in modo strategico per ottimizzare il flusso d'aria. La presenza di elementi architettonici come muri, alberi o altri ostacoli può influenzare il funzionamento del labirinto termico.

### 1.3 CARATTERISTICHE GENERALI DI FUNZIONAMENTO

Affinché un labirinto termico funzioni correttamente e offra i benefici desiderati, è necessario rispettare alcuni requisiti minimi:

**Dimensioni:** devono essere proporzionate alle esigenze di raffrescamento dell'edificio. È importante calcolare attentamente le dimensioni del labirinto in base al volume dell'edificio, al clima della zona e all'orientamento dell'edificio rispetto al vento.

**Profondità:** la profondità dei canali sotterranei dipende dalla temperatura del terreno e dal clima della zona. In climi caldi e secchi, è possibile utilizzare canali meno profondi. La profondità ottimale dei canali deve essere calcolata in base alle caratteristiche del terreno e alle esigenze di raffrescamento dell'edificio.

**Materiale:** i canali sotterranei possono essere realizzati con diversi materiali, come terra battuta, mattoni o calcestruzzo.

**Isolamento:** in climi freddi, i canali sotterranei possono essere isolati con materiali naturali come paglia, sughero o lana di pecora per evitare dispersioni di calore in inverno. L'isolamento è particolarmente importante se il labirinto termico viene utilizzato anche per favorire la circolazione dell'aria interna in inverno.

**Aperture:** le aperture di ingresso e uscita dell'aria devono essere posizionate strategicamente per favorire il flusso d'aria naturale. Le aperture di ingresso devono essere protette da griglie per evitare l'ingresso di animali o detriti. Le dimensioni e la posizione delle aperture devono essere calcolate in base al volume dell'edificio e alle caratteristiche del labirinto.

### 1.4 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO NATURALI UTILIZZATI E RELATIVE FASI DI FUNZIONAMENTO

**Ingresso dell'aria:** L'aria fresca esterna entra attraverso delle aperture posizionate strategicamente nella parte inferiore del labirinto.

**Filtraggio:** L'aria viene filtrata da elementi naturali come terra, sabbia o ghiaia per rimuovere polvere, allergeni e inquinanti.

**Canali sotterranei:** L'aria fresca filtrata scorre attraverso una rete di canali sotterranei, sfruttando la temperatura più fresca del terreno per raffreddarsi naturalmente.

**Risalita dell'aria fredda:** L'aria fredda sale naturalmente verso l'alto attraverso i canali, sfruttando la differenza di temperatura tra l'aria interna e quella esterna.

## 3 TECNOLOGIE E CONFIGURAZIONI DEL SISTEMA

### 3.1 TIPOLOGIE DI RIFERIMENTO E VARIANTI

**-Aspirazione attraverso canali a labirinto:** l'aria viene aspirata attraverso una rete di canali sotterranei che si snodano all'interno della struttura dell'edificio, assumendo una forma a labirinto. Questa conformazione permette di sfruttare l'effetto Venturi, incrementando la velocità del flusso d'aria e migliorando l'efficienza di aspirazione. Il design a labirinto contribuisce inoltre a smorzare il rumore del flusso d'aria, garantendo un funzionamento silenzioso.

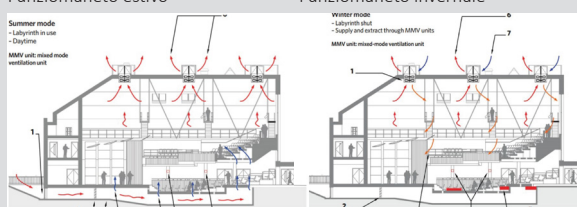
**-Labirinto verticale per edifici con più livelli sotterranei:** negli edifici con più piani sotterranei, il sistema di ventilazione a labirinto può essere sviluppato in verticale, sfruttando le pareti sotterranee come condotti naturali per il flusso d'aria. Questa configurazione permette di ottimizzare lo spazio disponibile e di ridurre al minimo l'impatto estetico sulla struttura dell'edificio.

**-Labirinto orizzontale per edifici con pochi piani sotterranei:** negli edifici con pochi piani sotterranei, il sistema di ventilazione a labirinto può essere sviluppato in orizzontale, utilizzando i piani sotterranei come livelli di canalizzazione. Questa soluzione offre una maggiore flessibilità nella progettazione e nell'adattamento alle specifiche esigenze dell'edificio.

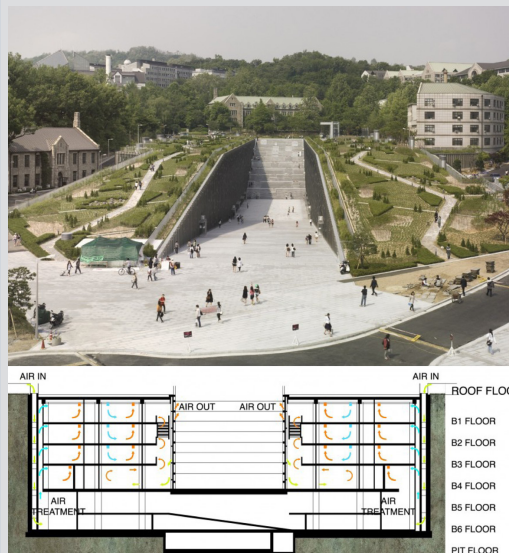
## 4 FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA

Funzionamento estivo

Funzionamento invernale



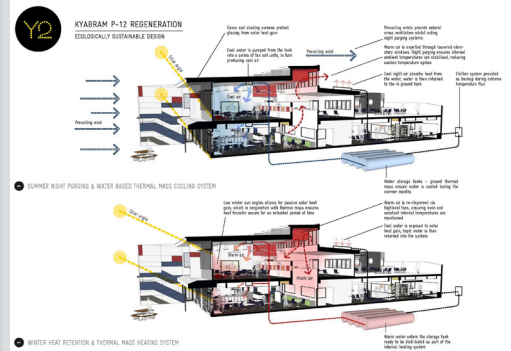
## 6\_CASI STUDIO



The Ewha Campus Center, in Seoul, Korea



Great Hall del Kent College, Canterbury, Regno Unito



Kyambra p-12 regeneration



# ESEMPI DI SISTEMI BIOCLIMATICI

## Appendice A2\_Famiglia dei SISTEMI A GUADAGNO SOLARE

### 01\_ATRIO BIOCLIMATICO



**CLASSIFICAZIONE**  
Sistema di guadagno solare diretto

**PAROLE CHIAVE**  
-ventilazione  
-raffrescamento  
-risparmio energetico

#### DEFINIZIONE

E' uno spazio architettonico che sfrutta principi di progettazione passiva per ottimizzare il comfort termico, il risparmio energetico e la qualità dell'aria interna di un edificio. La ventilazione naturale gioca un ruolo fondamentale in questo tipo di atrio, favorendo la circolazione dell'aria e contribuendo al raffreddamento passivo durante l'estate.

#### APPROCCIO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

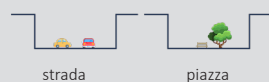
Adattamento  
Mitigazione



#### LIVELLO DI IMPATTO TECNICO-ECONOMICO



#### POSIZIONAMENTO



#### CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA

Regolabilità  
Adattabilità funzionale  
Flessibilità d'uso



#### INDICATORI

Trasmittanza  
Resistenza termica  
Esposizione

#### FONTI:

-Il retrofitting tecnologico, energetico e bioclimatico nell'edilizia tecnologica e soluzioni tecniche per il miglioramento della prestazione energetico-ambientale degli edifici; D. D'Olimpio; 2023  
-Sistemi Solari Passivi; E. Mazria; 1980  
-Atlante dei sistemi tecnologici per l'architettura bioclimatica: Riscaldamento passivo in architettura; F. Tucci; 2020

### 1\_DESCRIZIONE DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

#### 1.1 OBIETTIVO

Svolgono un ruolo di mediazione fra ambienti interni e spazio esterno e possono contribuire alla soluzione di diversi problemi ambientali che riguardano i grandi edifici, dall'illuminazione naturale, al contenimento dei consumi per il riscaldamento ed il condizionamento, fino alla ventilazione naturale. Tra gli obiettivi principali abbiamo:

**Ottimizzazione del comfort termico:** riscaldamento passivo e raffreddamento passivo.

**Risparmio energetico:** riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffreddamento e sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili.

**Miglioramento della qualità dell'aria interna:** ventilazione naturale e filtrazione naturale dell'aria anche attraverso l'uso della vegetazione.

#### 1.2 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

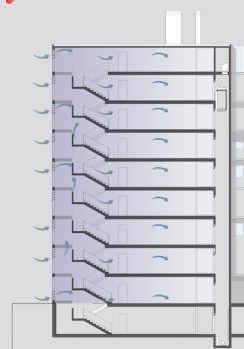
1. **Orientamento e forma:** l'atrio è generalmente orientato a sud per massimizzare l'apporto di calore solare durante l'inverno e una forma compatta e simmetrica aiuta a ridurre le dispersioni di calore e a favorire la ventilazione naturale.

2. **Aperture e schermi solari:** ampie finestre esposte a sud permettono di catturare il calore del sole durante l'inverno. Schermi solari orizzontali o verticali sopra le finestre aiutano a ridurre l'apporto di calore solare durante l'estate. Aperture posizionate in alto e in basso favoriscono la circolazione dell'aria naturale all'interno dell'atrio.

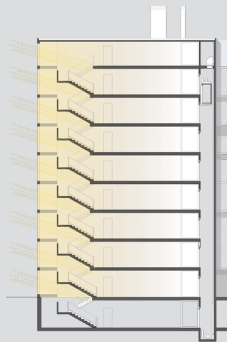
3. **Materiali:** materiali come pietra, cemento o mattoni vengono utilizzati per la costruzione delle pareti e del pavimento dell'atrio, in quanto hanno un'elevata capacità di assorbire e rilasciare calore lentamente. Questo contribuisce a stabilizzare la temperatura interna durante il giorno e la notte. Il vetro a bassa emissività viene utilizzato per le finestre per ridurre la dispersione di calore durante l'inverno e l'ingresso di calore durante l'estate.

4. **Vegetazione:** aiuta a filtrare l'aria, a ridurre la temperatura e ad aumentare l'umidità.

### 4\_FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA



In estate, l'atrio bioclimatico ventilato sfrutta il flusso d'aria naturale e la vegetazione per creare un microclima più fresco all'interno dell'edificio. Il flusso d'aria naturale attraverso le aperture dell'atrio permette di ventilare l'edificio in modo passivo, riducendo la necessità di utilizzare sistemi di climatizzazione artificiali.



In inverno, l'atrio bioclimatico ventilato sfrutta il guadagno solare e la massa termica dell'edificio per mantenere un clima interno confortevole. Le ampie aperture dell'atrio permettono ai raggi solari di penetrare in profondità nell'edificio, riscaldando direttamente gli elementi interni e l'aria all'interno dell'atrio.

### 1.3 CARATTERISTICHE GENERALI DI FUNZIONAMENTO

Le aperture dell'atrio, laterali e in copertura, possono essere utilizzate per attivare i meccanismi della ventilazione naturale sia per effetto camino, sfruttando l'estensione verticale dell'atrio, che attraverso il vento. Il suo volume agisce anche come un volano termico, ritardando e attenuando gli effetti delle variazioni di temperatura dell'ambiente esterno grazie all'inertza termica di una massa d'aria molto estesa in rapporto alle dimensioni dell'edificio. Gli atri costituiscono inoltre un serbatoio di aria preriscaldata durante l'inverno, mentre in estate possono favorire l'estrazione dell'aria esausta dall'edificio e l'espulsione della stessa verso l'esterno.

### 2\_ REQUISITI/VINCOLI DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

#### 2.2 VINCOLI

La progettazione dell'atrio bioclimatico deve essere attenta a non creare un impatto visivo negativo sul contesto urbano o paesaggistico e deve essere progettato per soddisfare le esigenze degli occupanti in termini di comfort termico, qualità dell'aria, fruibilità degli spazi e priva. Principali vincoli: clima locale, vincolo di spazio (dimensionamento adeguato, integrazione con l'edificio esistente), vincoli normativi (normative edilizie ed antincendio), costi (costi di progettazione e costruzione e di manutenzione), competenze specialistiche (progettazione e costruzione).

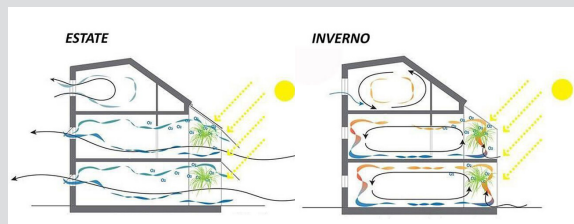
### 3\_ TECNOLOGIE E CONFIGURAZIONI DEL SISTEMA

#### 3.1 TIPOLOGIE DI RIFERIMENTO E VARIANTI

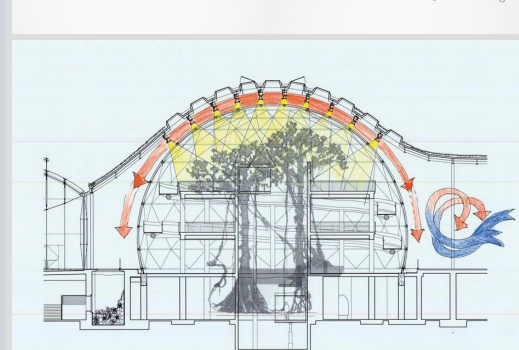
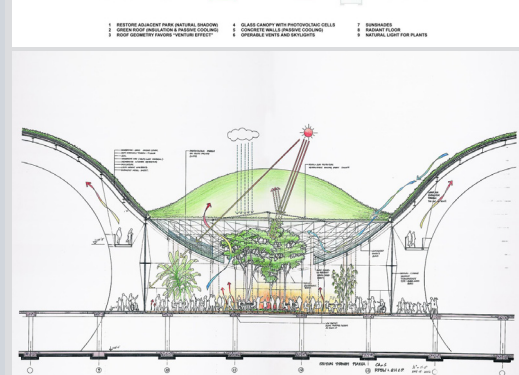
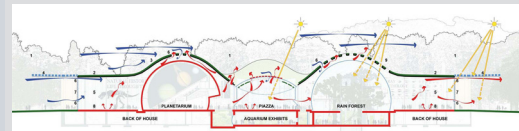
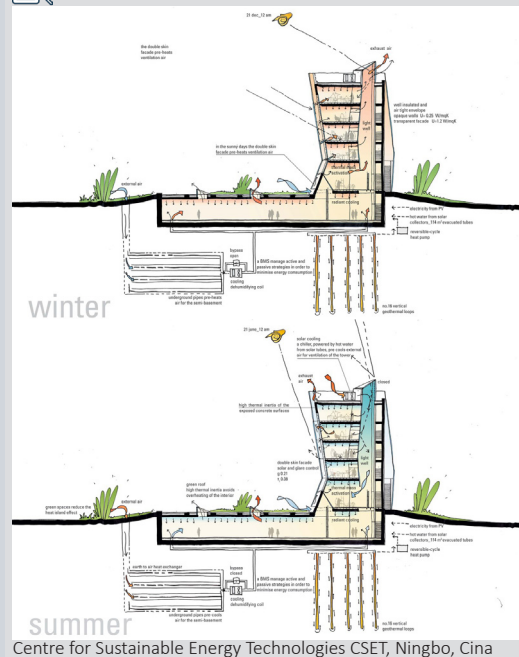
In rapporto ai problemi legati alla ventilazione naturale saranno descritte tre tipologie particolarmente significative che esemplificano i comportamenti molto diversi che gli atri possono assumere in relazione alla loro forma e dimensione, al rapporto morfologico con l'edificio ed all'estensione ed esposizione delle superfici vetrate.

#### 3.2 CONFIGURAZIONI DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

- Atrio esterno completamente o parzialmente avvolgente
- Atrio esterno laterale
- Atrio parzialmente esterno laterale a cielo
- Atrio intercluso terra-cielo
- Atrio parzialmente laterale
- Atrio intercluso copertura a cielo
- Atrio intercluso base a terra



### 6\_ CASI STUDIO

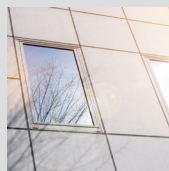


California Academy of Sciences, San Francisco, USA

# ESEMPI DI SISTEMI BIOCLIMATICI

## Appendice A3\_Famiglia dei SISTEMI DI OMBREGGIAMENTO

### 02\_VETRI A CONTROLLO SOLARE



**CLASSIFICAZIONE**  
Sistema di ombreggiamento

**PAROLE CHIAVE**  
- controllo luce solare  
- comfort termico  
- comfort visivo

#### DEFINIZIONE

Soluzione tecnica che consente di mantenere inalterate le caratteristiche architettoniche del prospetto, non interferendo minimamente sul suo disegno e sul suo assetto progettuale ma intervenendo sulla qualità e sulla tipologia del vetro. Permettono di gestire la radiazione solare che entra negli edifici riducendo il calore in eccesso durante l'estate, mantenendo gli ambienti freschi e confortevoli, permettere l'ingresso della luce naturale, illuminando gli spazi interni in modo omogeneo, diminuendo l'abbagliamento, creando un ambiente visivo più piacevole.

#### APPROCCIO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Adattamento  
Mitigazione



#### LIVELLO DI IMPATTO TECNICO-ECONOMICO

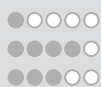


#### POSIZIONAMENTO



#### CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA

Regolabilità  
Adattabilità funzionale  
Flessibilità d'uso



#### INDICATORI

Illuminamento medio  
Trasmissione luminosa

#### FONTI:

"Performance of Solar Control Films on Building Glazing: A Literature Review" <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/12/5923>

"Thermal performance of a novel double-glazed window combining PCM and solar control glass in summer" <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148123012788>

Atlante dei sistemi tecnologici per l'architettura bioclimatica: Illuminazione naturale in architettura /Atlas of technological systems for bioclimatic architecture: Daylighting in architecture, F. Tucci; 2020

<https://archello.com/project/world-wildlife-fund-zeist>

<https://www.archdaily.com/506256/gucci-headquarters-genius-loci-architettura>

### 1\_DESCRIZIONE DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

#### 1.1 OBIETTIVO

Riduzione del carico termico energetico di origine solare in ingresso attraverso le superfici trasparenti dell'organismo edilizio, riduzione dei consumi energetici per il climatizzazione, miglioramento del comfort indoor, protezione dai raggi UV, miglioramento della resa energetica degli edifici.

#### 1.2 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

Si possono distinguere due categorie principali:

**Vetri stratificati:** sono composti da due o più lastre di vetro sovrapposte e sigillate tra loro con un interlayer. All'interno dell'interlayer può essere inserito il rivestimento a controllo solare, che può essere magnetronico, pirolitico, a pellicole.

**Vetri temperati:** sono sottoposti a un trattamento termico che li rende più resistenti agli urti e alle rotture. Possono essere ricoperti con un rivestimento a controllo solare sulla superficie esterna.

#### 1.3 CARATTERISTICHE GENERALI DI FUNZIONAMENTO

Il funzionamento si basa sull'applicazione di speciali rivestimenti applicati in superficie, che sono in grado di modificare le proprietà ottiche del vetro, influenzando il modo in cui la luce solare lo attraversa. In particolare, i rivestimenti a controllo solare possono riflettere una parte della luce solare, assorbire una parte della luce solare, permettere il passaggio della luce visibile, riflettere i raggi infrarossi.

#### 1.4 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO NATURALI UTILIZZATI E RELATIVE FASI DI FUNZIONAMENTO

I vetri a controllo solare non hanno un funzionamento che si svolge in fasi, il loro funzionamento è passivo e continuo. La loro funzione di controllo della luce solare avviene in modo automatico, grazie alle proprietà dei rivestimenti applicati sulla loro superficie. Agiscono come una barriera selettiva alla luce solare, lasciando passare la luce visibile e bloccando o riflettendo una parte della radiazione solare, in particolare i raggi infrarossi che generano calore. Questo meccanismo di funzionamento è costante e non richiede alcun intervento da parte dell'utente.

#### 2.2.2 VINCOLI AMBIENTALI POSIZIONALI

**Clima:** nelle regioni calde è fondamentale scegliere vetri con un fattore solare (g) molto basso e un'elevata riflessione solare per minimizzare l'ingresso di calore, mentre nelle regioni fredde è possibile optare per vetri con un fattore solare leggermente più alto e una buona trasmittanza luminosa (TL) per sfruttare l'apporto solare durante l'inverno.

**Orientamento delle finestre:** per finestre esposte a sud, è cruciale scegliere vetri con un fattore solare estremamente basso e un'alta riflessione solare per ridurre l'ingresso di calore nelle ore più calde della giornata, mentre per finestre esposte a nord si possono utilizzare vetri con un fattore solare un po' più alto e una buona trasmittanza luminosa per massimizzare l'illuminazione naturale.

**Inquinamento atmosferico:** in zone con alti livelli di inquinamento atmosferico, è consigliabile scegliere vetri con proprietà autopulenti che facilitano la rimozione di sporco e polveri, preservando la loro efficacia nel tempo.

#### 2.3 INTERAZIONI e CORRELAZIONI CON I SISTEMI TECNOLOGICO-ARCHITETTONICI

**Monitoraggio delle prestazioni:** I sensori integrati nei vetri possono monitorare le loro prestazioni in termini di fattore solare, riflessione solare e trasmittanza luminosa.

**Integrazione con sensori di luce:** per regolare automaticamente l'intensità dell'illuminazione artificiale in base alla quantità di luce naturale presente nell'ambiente.

**Ottimizzazione dei sistemi HVAC:** I dati raccolti dai sensori integrati nei vetri possono essere utilizzati per ottimizzare il funzionamento dei sistemi HVAC, garantendo un maggiore comfort e risparmio energetico.

**Vetri fotovoltaici:** Esistono vetri a controllo solare che integrano celle fotovoltaiche per la produzione di energia elettrica. Questa tecnologia permette di combinare i benefici del controllo solare con la produzione di energia rinnovabile.



## 1.5 MATERIALI UTILIZZABILI E DI RIFERIMENTO

**Vetro:** float, temperato, stratificato.

**Rivestimenti:** ossidi metallici (ossidi di titanio, zinco, argento e cromo), composti organici, nanoparticelle.

**Interlayer:** è lo strato di materiale che sigilla le lastre di vetro nei vetri stratificati. Può essere realizzato in PVB (polivinilbutirrale) o EVA (etilene vinil acetato).

**Distanziatori:** sono utilizzati nei vetri stratificati per mantenere la distanza tra le lastre di vetro. Possono essere realizzati in alluminio o acciaio inox.

**Sigillanti:** vengono utilizzati per sigillare i bordi dei vetri a controllo solare, impedendo la penetrazione di aria e acqua.

## 2\_ REQUISITI/VINCOLI DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

### 2.1 REQUISITI DI BASE

Dipendono da: clima della zona, le regioni calde sono caratterizzate da un fattore solare ( $g$ ) basso (inferiore a 0,35) e da un'alta riflessione solare (superiore al 50%), mentre le regioni fredde da un fattore solare ( $g$ ) più alto (tra 0,35 e 0,50) e buona trasmittanza luminosa ( $TL$ ) (superiore al 70%); orientamento delle finestre, se esposte a sud hanno un fattore solare molto basso ( $g \leq 0,30$ ) e alta riflessione solare (superiore al 60%), mentre se esposte a nord hanno un fattore solare più alto (tra 0,35 e 0,45) e buona trasmittanza luminosa ( $TL$ ) (superiore al 75%); tipologia di edificio, per gli edifici residenziali bisogna considerare il comfort interno, la riduzione dell'abbagliamento, il surriscaldamento ( $g \leq 0,40$ ,  $TL \geq 70\%$ , riflessione solare  $> 50\%$ ), e la protezione UV, mentre per gli edifici commerciali prevalgono i fattori di comfort interno, estetica, schermatura UV, efficienza energetica ( $g \leq 0,45$ ,  $TL \geq 60\%$ , riflessione solare  $> 40\%$ , protezione UV).

### 2.2.1. VINCOLI ARCHITETTONICI PROGETTUALI

**Dimensioni e peso:** possono essere più pesanti e voluminosi dei vetri tradizionali, a causa dei rivestimenti speciali applicati sulla loro superficie. È importante verificare la capacità di carico delle strutture esistenti prima di installare vetri a controllo solare.

**Compatibilità con infissi e serramenti:** devono essere compatibili con gli infissi e i serramenti esistenti in termini di dimensioni, spessore e modalità di apertura. Potrebbe essere necessario sostituire gli infissi o i serramenti non compatibili con i nuovi vetri.

## 3\_ TECNOLOGIE E CONFIGURAZIONI DEL SISTEMA

### 3.1 TIPOLOGIE DI RIFERIMENTO E VARIANTI

**Vetro magnetronico:** Ottenuto mediante un processo di deposizione di metalli in alto vuoto, offre un'elevata riflessione solare e una buona trasmittanza luminosa. Ideale per climi caldi e finestre esposte a sud.

**Vetro piroolitico:** Il rivestimento metallico viene applicato durante la fusione del vetro, garantendo una maggiore resistenza e durata nel tempo. Adatto a climi estremi e a grandi superfici.

**Vetro selettivo:** Caratterizzato da un rivestimento selettivo che lascia passare la luce visibile ma blocca i raggi infrarossi, riducendo l'ingresso di calore. Ideale per climi temperati e medi.

**Vetro basso emissivo:** Riduce la dispersione di calore dall'interno verso l'esterno durante l'inverno, migliorando l'efficienza energetica. Può essere combinato con altri rivestimenti a controllo solare.

## 4\_ FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA

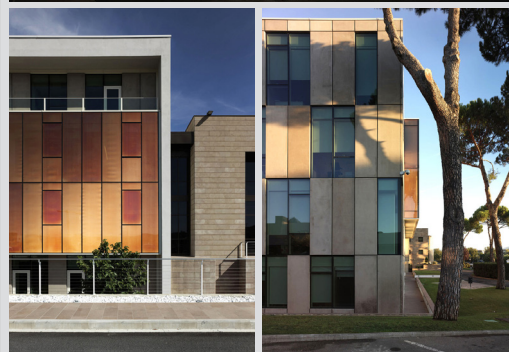
**In estate:** riducono la trasmittanza dei raggi infrarossi (IR), la componente della luce solare responsabile della maggior parte del calore percepito, bloccando una significativa porzione di questi raggi, impedendo che entrino nell'edificio e contribuiscano al surriscaldamento degli ambienti interni; mantengono alta la trasmittanza della luce visibile, lasciando passare la maggior parte della luce visibile, garantendo un'elevata luminosità naturale all'interno degli edifici.

**In inverno:** permettono l'ingresso dei raggi infrarossi (IR), necessari per riscaldare l'edificio durante i mesi freddi, contribuendo a mantenere il calore all'interno dell'edificio e a ridurre i consumi energetici per il riscaldamento; riducono la dispersione di calore, presentando un basso coefficiente di emissività, che significa che rilasciano meno calore verso l'esterno rispetto ai vetri tradizionali. Questo contribuisce a migliorare l'isolamento termico dell'edificio e a ridurre le dispersioni di calore durante i mesi più freddi.

## 6\_ CASI STUDIO



Sede Amministrativa WWF, Zeist, Olanda



Gucci Headquarter, Firenze, Italia

# ESEMPI DI SISTEMI BIOCLIMATICI

## Appendice A3\_Famiglia dei SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO

### 01\_LETTO O MURO DI ROCCIA O PIETRE



**CLASSIFICAZIONE**  
Sistema per l'accumulo termico

**PAROLE CHIAVE**  
- serra solare  
- collettore solare  
- stratificazione termica

#### DEFINIZIONE

Il sistema è un muro di pietre a secco, isolato con bocchette. Sfrutta la grande capacità termica delle pietre.

Il Rock-Bed o letto di pietre e il Sand-Bed o letto di sabbia sono sistemi per l'accumulo termico realizzati con una massa totalmente isolata che sfrutta le proprietà termiche rispettivamente delle pietre e della sabbia: in entrambi l'aria che ne attraversa gli interstizi vi immette o rimuove il calore che una volta accumulato può essere trasferito, sempre attraverso moti convettivi, negli ambienti interni. Poiché la funzione dell'aria tra gli inerti è fondamentale, le pietre vengono posizionate a strati senza legante e racchiuse in vasche o contenitori isolati termicamente. Quando si progettano soluzioni con rock-bed bisogna tenere a mente di utilizzare pietre a bassa emissività di gas radon oppure progettare ricircoli d'aria chiusi.

**APPROCCIO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**  
Adattamento  
Mitigazione

#### LIVELLO DI IMPATTO TECNICO-ECONOMICO



#### POSIZIONAMENTO



#### CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA

Regolarità  
Adattabilità funzionale  
Flessibilità d'uso

#### INDICATORI

Convezione  
Irraggiamento  
Umidificazione  
Trasmittanza termica  
Irraggiamento

#### FONTI:

- Efficienza Energetica nella progettazione: Energie rinnovabili, Bioclimatica, Nuove tecnologie, Normativa, Mauro Spagnolo, 2007.
- Il raffreddamento passivo degli edifici in zone a clima temperato, Mario Grosso, II edizione, 2008.
- Involucro, Clima, Energia: Qualità bioclimatica ed efficienza energetica in architettura nel progetto tecnologico ambientale della pelle degli edifici; F. Tucci; Altralinea edizioni; 2014.
- <https://www.arkintilt.com/dsouza-de-la-torre-residence>
- <https://www.aiatopen.org/node/162>

### 1\_DESCRIZIONE DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

#### 1.1 OBIETTIVO

**Risparmio energetico:** il sistema permette di ridurre il consumo di energia per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici, sfruttando l'energia solare gratuita durante il giorno e rilasciandola durante la notte o nei periodi di scarsa insolazione.

**Miglior comfort termico:** fornendo una temperatura costante e uniforme durante le 24 ore, indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne, grazie alla capacità di mitigazione della temperatura esterna in ingresso.

**Riduzione delle emissioni di CO2:** associate al consumo di combustibili fossili per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici, si tratta infatti di un sistema passivo che sfrutta principi naturali senza la necessità di integrazioni di sistemi meccanici o elettrici.

#### 1.2 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

**Muro:** deve essere isolato su entrambe le facce. Darò il forte isolamento del muro il sistema vetrato può essere a vetro singolo; la faccia esterna del muro deve essere di colore scuro o avere una piastra assorbente metallica mentre la superficie interna dovrebbe essere dipinta chiara. Delle ventoline per forzare la ventilazione nel muro possono essere posizionate nei pressi delle bocchette inferiore esterna e superiore interna. **Sottopiano:** viene applicato sotto il pavimento del piano terra in una vasca isolata verso il terreno. Solitamente questo sistema presenta delle condutture con piccole ventole all'interno per riutilizzare l'aria più calda della parte alta dell'edificio, queste infatti incrementano il rock-bed di aria a temperatura maggiore da immettere nella parte bassa dell'edificio mantenendolo tutto a una stessa temperatura, inoltre le condutture servono per immettere aria fresca nelle zone alte dell'edificio durante l'estate. La fonte di guadagno termico principale del sistema è quello diretto della radiazione solare che passa attraverso le vetrate a sud per questo il letto di pietre deve essere posizionato in prossimità di queste e il rivestimento superiore non deve contenere isolante. Rocce di dimensioni uniformi tra 20 e 50 mm sono raccomandate per un accumulo breve di uno o due giorni. Devono inoltre essere a bassa emissività di particelle fini dannose per la salute, una volta scelte prima della posa in opera vanno lavate ed asciugate. Il volume del letto di pietre dovrebbe essere pari all'area della superficie vetrata per 0,6.

#### 2.3 INTERAZIONI e CORRELAZIONI CON I SISTEMI TECNOLOGICO-ARCHITETTONICI

**Sistemi solari termici:** che utilizzano collettori solari per catturare l'energia solare e convertirla in calore. Il Rock-bed può essere utilizzato per immagazzinare l'energia termica in eccesso garantendo una fornitura di calore costante anche in periodi di scarsa insolazione.

**Sistemi di geotermia:** sfruttano il calore naturale presente nel sottosuolo per riscaldare o raffreddare gli edifici. Il Rock-bed può essere utilizzato per integrare l'energia geotermica con altre fonti energetiche rinnovabili, come l'energia solare, creando un sistema ibrido.

**Sistemi di raffreddamento evaporativo:** utilizzano l'evaporazione dell'acqua per raffreddare l'aria. Il Rock-bed può essere utilizzato per pretrattare l'aria in ingresso nei sistemi di raffreddamento evaporativo, aumentando l'efficienza del processo di raffreddamento.

### 3\_TECNOLOGIE E CONFIGURAZIONI DEL SISTEMA

#### 3.1 TIPOLOGIE DI RIFERIMENTO E VARIANTI

**Rock-Bed sottopiano:** funzionamento simile a quello a muro, ma si ha il vantaggio dell'ambiente illuminato; per aumentare l'efficienza del sistema e per una distribuzione omogenea dell'aria si usano canalizzazioni con ventole. Questa variante permette l'illuminazione naturale dell'ambiente interno attraverso il posizionamento del sistema di pietre sotto il pavimento del piano terra, in una vasca isolata verso il terreno. Le condutture verticali integrate nei muri interni dell'edificio, con piccole ventole all'interno per riutilizzare l'aria più calda prelevata dalla parte alta dell'ambiente, "alimentano" il Rock-Bed di aria a temperatura maggiore da immettere nella parte bassa dell'ambiente o dell'edificio, mantenendolo tutto a una stessa temperatura. Viceversa durante l'estate le condutture servono per immettere aria fresca nelle zone più alte dell'ambiente o dell'edificio. La principale fonte di guadagno termico del sistema è quella della radiazione solare diretto che passa attraverso le vetrate esposte a sud, inoltre il rivestimento superiore non deve contenere isolante.

### 1.3 CARATTERISTICHE GENERALI DI FUNZIONAMENTO

Massa totalmente isolata che sfrutta le proprietà termiche delle pietre: l'aria che ne attraversa gli interstizi vi immette o rimuove il calore che una volta accumulato può essere trasferito, sempre attraverso moti convettivi, negli ambienti interni.

Il sistema Rock-bed, noto anche come "accumulatore di energia termica a letto di roccia", è un sistema di stoccaggio termico passivo che utilizza la capacità termica di rocce o altri materiali granulari per accumulare energia termica durante il giorno e rilasciarla durante la notte.

### 1.4 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO NATURALI UTILIZZATI E RELATIVE FASI DI FUNZIONAMENTO

**Conduttività termica del materiale:** un materiale con alta conduttività termica permette un trasferimento di calore più rapido tra l'aria e le rocce, aumentando l'efficienza del sistema.

### 1.5 MATERIALI UTILIZZABILI E DI RIFERIMENTO

**Rocce:** Le rocce più comunemente utilizzate per il Rock-bed sono il granito, il basalto e l'arenaria. Queste rocce hanno una conduttività termica elevata e una capacità termica elevata, permettendo un rapido trasferimento di calore e un accumulo di energia efficiente.

**Ghiaia:** la ghiaia è un'altra opzione diffusa per il Rock-bed. È un materiale economico e facilmente reperibile, con una buona conduttività termica e capacità termica.

**Concreto:** il calcestruzzo può essere utilizzato per il Rock-bed, soprattutto se si desidera una struttura più rigida e resistente. Tuttavia, la sua conduttività termica è inferiore rispetto alle rocce o alla ghiaia, quindi potrebbe essere necessario un letto di roccia più grande per ottenere la stessa efficienza.

## 2. REQUISITI/VINCOLI DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

### 2.2.1. VINCOLI ARCHITETTONICI PROGETTUALI

Non permette l'illuminazione naturale dell'ambiente interno, per questo molto spesso viene applicato "a letto" sotto il pavimento del piano terra in una vasca isolata verso il terreno.

### 3.2 CONFIGURAZIONI DEL SISTEMA BIOCLIMATICO

Il rock-bed deve essere ben isolato dall'attacco a terra. Rocce di dimensioni uniformi tra 20 e 50 mm sono raccomandate per un accumulo breve, di 1 o 2 giorni. Le rocce devono essere scelte con attenzione perché molte sprigionano gas radon o particelle fini dannose alla salute; scelte le pietre devono essere lavate e asciugate prima della messa in opera. Il volume del letto di pietre dovrebbe essere pari all'area della superficie vetrata x 0,6.

### 3.3 POSSIBILITA' DI AUTOMAZIONE E DI INTEGRAZIONE CON LA DOMOTICA

Può utilizzare sensori di temperatura e attuatori per controllare il flusso d'aria attraverso il Rock-bed in base a una temperatura impostata.

## 4. FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA

**MURO In inverno:** durante le giornate invernali il sole riscalda l'intercapedine tramite effetto serra, l'aria calda viene fatta passare nel rock-bed con l'ausilio di ventoline, le pietre cominciano ad assorbire calore; nelle ore notturne le bocchette interne sono aperte e l'aria dell'ambiente si scalda attraversando il letto di pietre.

**In estate:** durante il giorno un sistema oscurante evita l'irraggiamento solare diretto, le bocchette interne sono aperte e il letto di pietre assorbe l'aria calda interna restituendola fresca; di notte le bocchette sono aperte e il rock-bed si raffredda con l'aria dell'intercapedine esterna.

**SOTTOPIANO In inverno:** durante il giorno l'oscurante non è azionato e il rock-bed si riscalda con i raggi diretti del sole e comincia a irradiare calore; mentre di notte le bocchette sono aperte e l'aria riscaldata dalle pietre viene immessa nell'ambiente dal basso e recuperata dall'alto.

**In estate:** durante il giorno un sistema oscurante evita l'irraggiamento solare diretto, le bocchette sono aperte e l'aria fresca in basso passa nel rock-bed, una ventola immette l'aria rinfrescata nelle zone alte dell'ambiente; mentre di notte il circolo dell'aria è lo stesso ma il sistema viene rinfrescato anche aspirando l'aria vicino alla finestra.

## 6\_CASI STUDIO



D'Souza & De La Torre House, Belomnt, California



Eastern Sierra House, Gardnerville, Nevada



## Appendice B

Appendice tecnica di supporto al Capitolo 4 della tesi, dedicata alla raccolta e sistematizzazione delle schede dei casi studio relativi a edifici e progetti internazionali che adottano sistemi riconducibili al Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS). Il documento presenta un'analisi comparativa dei casi selezionati attraverso parametri climatici, configurazioni spaziali, soluzioni tecnologiche, prestazioni energetiche e strategie di ventilazione passiva, con l'obiettivo di individuare modelli replicabili e criteri progettuali utili al contesto mediterraneo.

**CODICE CS\_ NOME PROGETTO**

**PROGETTISTA**

AN

**LUOGO**

AREA

COSTO

DESTINAZIONE D'USO

COM SCO UNI UFF OSP HUB CU



coordinate

altitude

densità

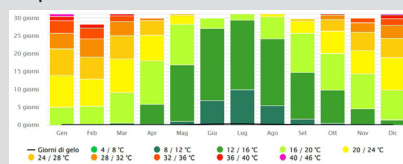
**zona climatica**

\*secondo il sistema Köppen-Geiger

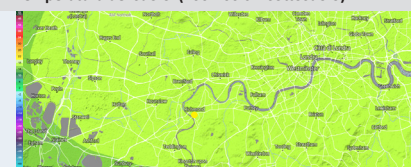
Umidità del suolo (100-200 cm sottosuolo)



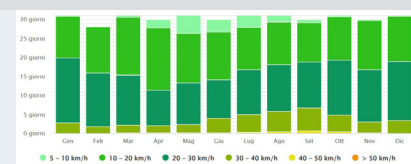
Temperature maximale



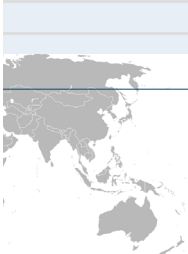
Temperatura del suolo (100-200 cm sottosuolo)



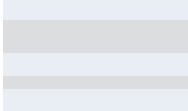
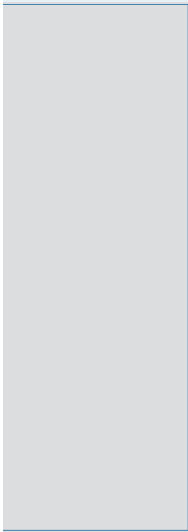
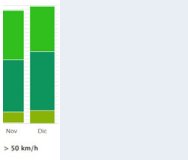
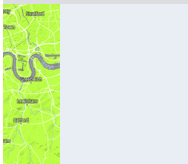
### Velocità del vento



NUMERO SCHEDA, CODICE CA

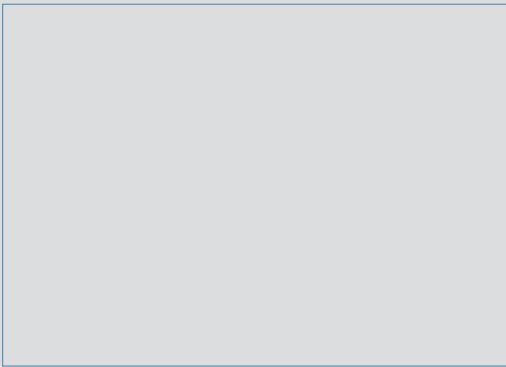
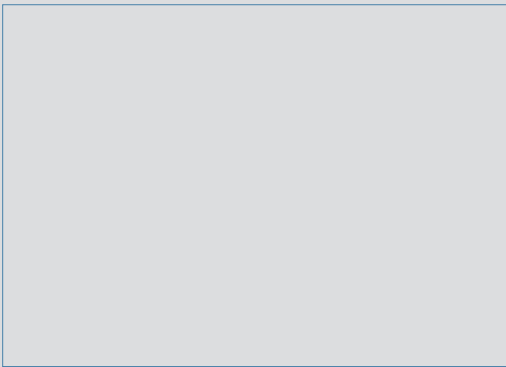
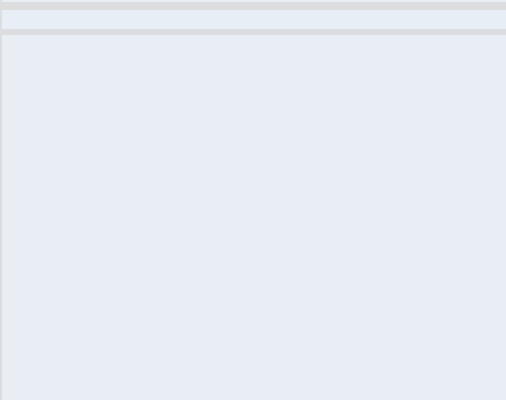
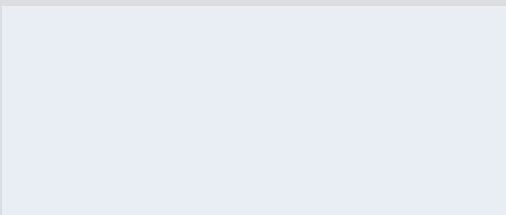


<https://www.meteoblue.com>

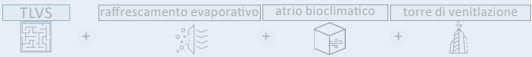


CODICE CASO STUDIO

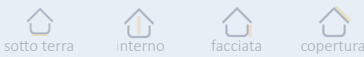
CODICE CS\_ NOME PROGETTO



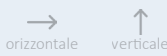
Sistema tecnologico e possibile collaborazione con:



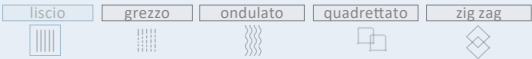
Collocazione dei sistemi:



Sviluppo del sistema TLVS:



Tipologia del sistema TLVS:



Integrazione della tecnologia



Prestazioni energetiche



Risparmio fabbisogno energetico



Comfort indoor



Grado di durabilità



Manutenzione



Costo di messa in opera



Tempi di realizzazione

NUMERO SCHEDA , CODICE CASO STUDIO

# Analisi di mercato dei prodotti costitutivi del TLVS

Appendice C\_Esempio di Raccolta di Dati dei prodotti da Tabella Excel

| <b>CODICE</b> | <b>PRODUTTORE</b>                             | <b>SEDE DI PRODUZIONE</b> | <b>LINK</b>                                                                                   | <b>Settore di utilizzo del prodotto</b> |
|---------------|-----------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| CLaTa_01      | TOP AIR_ SÜDLUFT                              | Italia                    | <a href="https://www.top-air.it">https://www.top-air.it</a>                                   | edilizia/costruzione                    |
| CLaTa_02a     | jeremias chimney System                       | //                        | <a href="https://www.bovema.it">https://www.bovema.it</a>                                     | edilizia/costruzione                    |
| CLaTa_02b     | //                                            | //                        | <a href="https://jeremias.it">https://jeremias.it</a>                                         | edilizia/costruzione                    |
| CLaTa_03      | Midtherm Engineering Ltd                      | Dudley ,Regno Unito       | <a href="https://www.mideng.net">https://www.mideng.net</a>                                   | Edilizia (scolastica, terziaria, in     |
| CLaTa_04      | Intelmann GmbH                                | Scheeßel, Germania        | <a href="https://intelmann.net">https://intelmann.net</a>                                     | edilizia/costruzione                    |
| CLaC_01       | Holcim Aggregati Calcestruzzi S.r.l.          | Milano, Italia            | <a href="https://www.holcim.it">https://www.holcim.it</a>                                     | edilizia/costruzione                    |
| CLaC_02       | Heidelbergmaterials                           | Svizzera                  | <a href="https://www.heidelbergmaterials.it">https://www.heidelbergmaterials.it</a>           | edilizia/costruzione                    |
| CLaC_03a      | Mapei S.p.A.                                  | Milano, Italia            | <a href="https://www.mapei.com">https://www.mapei.com</a>                                     | edilizia e infrastrutture               |
| CLaC_03b      | //                                            | //                        | //                                                                                            | edilizia/costruzione                    |
| CLaC_03c      | //                                            | //                        | //                                                                                            | edilizia e infrastrutture               |
| CLaC_04       | Penetron International Ltd                    | Collegno , Italia         | <a href="https://www.penetron.it">https://www.penetron.it</a>                                 | edilizia e infrastrutture, costruz      |
| CLaCb_01      | Progress S.p.A. (Progress Group)              | Bressanone, Italia        | <a href="https://www.edilportale.com">https://www.edilportale.com</a>                         | edilizia civile ed industriale          |
| CLaCb_02      | Magnetti Building S.p.A.                      | Carvico, Italia           | <a href="https://www.magnetti.it">https://www.magnetti.it</a>                                 | edilizia/costruzione                    |
| CLaCb_03      | Società Emiliana Prefabbricati S.p.A. (SEP)   | Italia                    | <a href="https://www.seprefabbricati.it">https://www.seprefabbricati.it</a>                   | edilizia e infrastrutture               |
| CLaCb_04      | Zanon Prefabbricati S.r.l.                    | Cittadella _ Italia       | <a href="https://www.zanonprefabbricati.com">https://www.zanonprefabbricati.com</a>           | edilizia civile ed industriale          |
| CLaCb_05      | Kerkstoel 2000+                               | Grobbendonk, Belgio       | <a href="https://www.tesisystem.it/">https://www.tesisystem.it/</a>                           | edilizia e infrastrutture               |
| CLaCb_06      | Baracalit S.p.A.                              | Bibbiena – Italia         | <a href="https://www.infobuild.it">https://www.infobuild.it</a>                               | industriale                             |
| CLaCb_07      | Magnetti Building S.p.A.                      | Carvico_ Italia           | <a href="https://www.magnetti.it">https://www.magnetti.it</a>                                 | edilizia/costruzione                    |
| CLaCb_08      | ArchiEXPO                                     | Regno Unito               | <a href="https://www.archiexpo.it">https://www.archiexpo.it</a>                               | edilizia/costruzione                    |
| CLaCb_09      | Zanon Prefabbricati S.r.l.                    | Cittadella _ Italia       | <a href="https://www.zanonprefabbricati.com">https://www.zanonprefabbricati.com</a>           | industriale                             |
| PLaMtf_01     | Italpannelli                                  | Abruzzo, Italia           | <a href="https://www.italpannelli.it">https://www.italpannelli.it</a>                         | edilizia/costruzione                    |
| PLaMtf_02     | MuroForm                                      | Bergamo, Italia           | <a href="https://www.muroform.it">https://www.muroform.it</a>                                 | edilizia/costruzione                    |
| PLaMtf_03     | BETON UNO                                     | Milano, Italia            | <a href="https://www.beton-uno.it/">https://www.beton-uno.it/</a>                             | edilizia/costruzione                    |
| PLaMtf_04     | PLASMACEM                                     | Vicenza, Italia           | <a href="https://www.plasmacem.com">https://www.plasmacem.com</a>                             | edilizia/costruzione                    |
| PLaMtf_05     | COPLAN                                        | Milano, Italia            | <a href="https://www.coplan.it/">https://www.coplan.it/</a>                                   | edilizia/costruzione                    |
| PLaMtf_06     | Kniefer_ klimatechnik                         | Stoccarda, Germania       | <a href="https://www.kieferklima.de">https://www.kieferklima.de</a>                           | edilizia/costruzione                    |
| PLaMtf_07     | Southern-Style Labyrinth PROJECT STASIO       | -                         | <a href="https://projectstasio.com">https://projectstasio.com</a>                             | edilizia/costruzione                    |
| PLaMtf_08     | Turkish Contractors Association (TCA)         | Ankara, Turchia           | <a href="https://www.tmb.org">https://www.tmb.org</a>                                         | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_01       | DONKEN                                        | Bergamo, Italia           | <a href="https://www.doerken.com">https://www.doerken.com</a>                                 | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_02       | ISOVER                                        | Milano, Italia            | <a href="https://www.isover.it">https://www.isover.it</a>                                     | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_03       | RIWEGA                                        | Bolzano, Italia           | <a href="https://edilcommerce.com">https://edilcommerce.com</a>                               | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_04       | INDEX Construction Systems and Products S.p.A | Verona, Italia            | <a href="https://prodottiesoluzioni.indexspa.it/">https://prodottiesoluzioni.indexspa.it/</a> | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_05_a     | Sika Italia                                   | Milano, Italia            | <a href="https://ita.sika.com">https://ita.sika.com</a>                                       | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_05_b     | //                                            | //                        | //                                                                                            | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_05_c     | //                                            | //                        | //                                                                                            | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_06_a     | Mapei                                         | Italia                    | <a href="https://www.mapei.com">https://www.mapei.com</a>                                     | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_06_b     | //                                            | //                        | //                                                                                            | edilizia/costruzione                    |
| CLaR_06_c     | //                                            | //                        | //                                                                                            | edilizia/costruzione                    |
| CLaFa_01      | Bruno Balducci Srl                            | Lodi ,Italia              | <a href="https://www.brunobalducci.com">https://www.brunobalducci.com</a>                     | industriale                             |
| CLaFa_02      | Vefim S.r.l.                                  | Verona, Italia            | <a href="https://vefim.it/">https://vefim.it/</a>                                             | Edilizia (scolastica, terziaria, in     |
| CLaFa_03      | HW Ventilation S.r.l.                         | Rescaldina, Italia        | <a href="https://www.hwventilation.it">https://www.hwventilation.it</a>                       | industriale                             |
| CLaFa_04      | MPGamma Srl                                   | Italia                    | <a href="https://www.mpgamma.com/">https://www.mpgamma.com/</a>                               | edilizia/costruzione                    |
| CLaFa_05a     | AeroFiltri S.r.l. (brand AeroFeel)            | Milano, Italia            | <a href="https://www.aerofeel.com">https://www.aerofeel.com</a>                               | Edilizia (scolastica, terziaria, in     |
| CLaFa_05b     | AeroFiltri S.r.l. (brand AeroFeel)            | //                        | //                                                                                            | edilizia e infrastrutture, costruz      |

| <i>prodotto</i>                 | <i>Prezzo</i>         | <i>Materiale</i>                                 | <i>Densità [kg/m3]</i> | <i>Peso [kg/m2]</i> |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|------------------------|---------------------|
| ziaria, industriale, sanitaria) | -                     | Acciaio inox                                     | ~8000                  | 310                 |
|                                 | -                     | Acciaio inox                                     | n/a                    | n/a                 |
|                                 | -                     | Acciaio inox                                     | n/a                    | n/a                 |
|                                 | -                     | Corpo in lega di alluminio                       | ~2700                  | 20–40               |
|                                 | €247,69               | Acciaio inox                                     | ~8 000                 | ~8                  |
| e                               | ~ 250-295             | Calcestruzzo cementizio                          | ~2.400                 | ~250                |
|                                 | ~100 a 160 €/m³       | Calcestruzzo                                     | ~2.350                 | 240–750             |
|                                 | ---                   | polimeri come poliacrilati, policarbossilati     | 1.000 – 1.600          | n/a                 |
|                                 | ---                   | Malta minerale modificata                        | 800-1700               | n/a                 |
|                                 | ---                   | Malta cementizia                                 | n/a                    | ≈ 20                |
| e, costruzioni idrauliche       | ~ 8–15 €/kg           | Additivo idroreattivo cristallino in polvere     | 900                    | ≈ 8–10              |
| triale                          | ---                   | Calcestruzzo armato                              | ~2400                  | n/a                 |
|                                 | ~130 a 250 €/m²       | Calcestruzzo armato                              | ~2.400                 | ≈ 450 – 700         |
| e                               | ---                   | Calcestruzzo armato                              | ~ 2.300–2.500          | ≈ 184 – 750         |
| triale                          | ~80–130 €/m²          | Calcestruzzo armato                              | 2200–2500              | ≈ 350–500           |
| e                               | ---                   | Calcestruzzo armato                              | ~2.400                 | ≈ 480               |
|                                 | ---                   | Calcestruzzo armato                              | ~2.400                 | n/a                 |
|                                 | ~ 90 a 160 €/m²       | Calcestruzzo armato                              | ~2.400                 | ≈ 520–610           |
|                                 | ~ 100–150 €/m²        | Calcestruzzo armato                              | ~2200–2500             | ≈ 250 a 600         |
|                                 | ---                   | Calcestruzzo armato                              | ≈ 2400–2600            | ≈ 1300              |
|                                 | ~ € 11,32             | Polistirene espanso sinterizzato (EPS)           | n/a                    | ~0,38               |
|                                 | -                     | Polistirene espanso                              | ~25                    | 0,05–0,075          |
|                                 | ~ 198,00€/mq          | Poliuretano elastomerico                         | 25–30                  | 11,9                |
|                                 | -                     | Poliuretano elastomerico (PU)                    | 485                    | ---                 |
|                                 | -                     | -                                                | n/a                    | ---                 |
|                                 | -                     | -                                                | ---                    | ---                 |
|                                 | -                     | -                                                | n/a                    | ---                 |
|                                 | -                     | -                                                | n/a                    | ---                 |
|                                 | ~ 10,80 € al m2       | Composizione di film in PE                       | ~583                   | 350                 |
|                                 | ~ 4,30 € al m2        | Glass Tissue + Aluminum                          | ~1000                  | 230                 |
|                                 | ~ 141,93€             | PP–PE–Alu–PE–PP                                  | ~600                   | 0,130               |
|                                 | ~ €209–€254           | -                                                | ---                    | ---                 |
|                                 | ~ € 30–50/m²          | Miscela di cementi                               | ~ 1.2                  | 15                  |
|                                 | ---                   | Poliuretano                                      | ---                    | 211                 |
|                                 | ---                   | Poliurea aromatica bicomponente                  | ---                    | ---                 |
|                                 | ---                   | Emulsione bituminosa                             | 1200                   | ~1,7                |
|                                 | ---                   | Bitume modificato                                | 1350                   | ~2,7                |
|                                 | ---                   | Film poliolefinico (FPO)                         | 1300                   | ≥ 1,3               |
|                                 | ---                   | acciaio verniciata                               | 480–520                | 50                  |
|                                 | ---                   | acciaio zincato                                  | 250                    | ≈ 108               |
| ziaria, industriale, sanitaria) | ---                   | Alluminio                                        | n/a                    | ≈ 4–6               |
|                                 | ~€ 10-25              | Media sintetica piegata + telaio cartone/lamiera | ~ 200                  | ≈ 0,23              |
|                                 | ~ € 112,24 a € 305,00 | plastica                                         | ~250                   | ~10                 |
|                                 | ~ € 18,98             | tecnopolimero senza metallo                      | ~ 250                  | 6,25                |
|                                 |                       |                                                  |                        |                     |

# Analisi di mercato\_SCHEDA TIPO PRODOTTI

## Appendice C1\_

### CODICE PRODOTTO

Produttore: \_\_\_\_\_  
Fornitore: \_\_\_\_\_  
Sede di produzione: \_\_\_\_\_  
Sito internet: \_\_\_\_\_  
Contatti: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

 Descrizione del prodotto:

\_\_\_\_\_

 Tipo di impiego: \_\_\_\_\_

€ Costo: \_\_\_\_\_

Allegati:

#### Classificazione per complessità di prodotto

- ☐ Materiale trattato industrialmente amorfo ☐ Semi-componente ☐ Prodotto edilizio completo  
☐ Materiale semilavorato ☐ Componente  
☐ Materiale e/o componente semilavorato a sistema ☐ Componente a sistema

#### Classificazione del sistema tecnologico\_ norma UNI8290

| Classi unità tecnologiche                                                                                                                                                                                                   | Unità tecnologiche               | Classi di elementi tecnici                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Struttura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici appartenenti al sistema edilizio aventi funzione di sostenere i carichi del sistema edilizio stesso e di collegare staticamente le sue parti. | struttura di fondazione          | strutture di fondazione dirette<br>strutture di fondazione indirette                                                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                             | struttura di elevazione          | strutture di elevazione verticali<br>strutture di elev. orizzontali ed inclinate<br>strutture di elevazione spaziali                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                             | struttura di contenimento        | strutture di contenimento verticali<br>strutture di contenimento orizzontali                                                                                           |
| <b>Chiusura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi in terni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.          | chiusura verticale               | pareti perimetrali verticali<br>infissi esterni verticali<br>solai a terra<br>infissi orizzontali<br>solai su spazi aperti<br>coperture<br>infissi esterni orizzontali |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura orizzontale inferiore   | pareti interne verticali<br>infissi interni verticali                                                                                                                  |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura orizz. su spazi esterni | elementi di protezione                                                                                                                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura superiore               | solai<br>soppalchi<br>infissi interni orizzontali<br>scale interne<br>rampe interne                                                                                    |
| <b>Partizione interna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.                         | partizione interna verticale     | elementi di protezione<br>elementi di separazione<br>balconi e logge<br>passerelle<br>scale esterne<br>rampe esterne                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione interna orizzontale   |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione interna inclinata     |                                                                                                                                                                        |
| <b>Partizione esterna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi esterni connessi con il sistema edilizio stesso.             | partizione esterna verticale     |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione esterna orizzontale   |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione esterna inclinata     |                                                                                                                                                                        |

#### Classe di Esigenze\_ norma UNI8289:1981

|  Sicurezza                      |  Benessere                    |  Affidabilità                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Resistenza meccanica            | Tenuta all'acqua              | Resistenza ai fenomeni chimici e fisici  |
| Resistenza a compressione       | Permeabilità all'aria         | Durata                                   |
| Resistenza a trazione           | Isolamento termico            |  Fruibilità                              |
| Resistenza agli urti            | Comportamento igrometrico     | Attrezzabilità                           |
| Resistenza all'abrasione        | Isolamento acustico           |  Gestione                                |
| Comportamento al fuoco          | Emissione di sostanze nocive  | Manutenibilità                           |
| Resistenza agli agenti chimici  | Ventilazione                  |  Salvaguardia dell'ambiente              |
| Resistenza al gelo              |  Aspetto                      | Influenza sui consumi energetici         |
| Stabilità dimensionale          | Regolarità di aspetto         |                                                                                                                               |

#### Caratteristiche dimensionali ed eventuali pezzi speciali

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

SCHEDA n.- CODICE

**CODICE PRODOTTO**

**Caratteristiche fisiche e termiche del prodotto**

 Materiale:

 Densità [kg/m3]:

 Conducibilità termica  $\lambda$  [W/mK]:

 Peso [kg/m2]:

 Calore specifico [J/KgK]:

**Proprietà meccaniche e resistenze**

 Resistenza:

 Comportamento al fuoco:

**Proprietà di protezione e isolamento**

 Resistenza agli agenti chimici\_permeabilità al metano:

 Tenuta all'acqua:

 Permeabilità al vapore acqueo [g/m2 /24]:

**Comportamento con variazioni di temperatura**

 Resistenza al gelo:

 Stabilità di forma a caldo:

**Proprietà meccaniche specifiche**

 Resistenza a trazione a rottura [L/T]:

 Resistenza alla trazione delle giunzioni [L/T]:

 Allungamento alla massima resistenza alla trazione:

 Resistenza alla lacerazione (metodo del chiodo):

**Aspetto e durata**

 Colore:

 Durata:

**Uso e Manutenzione**

**Sistema di fissaggio**



**Tempo medio di messa in opera**



**Distaccante**



**Risorse umane**

**FASI della messa in opera**

**Altre info**

**Immagini del prodotto**



# Analisi di mercato\_ esempio delle schede

## Appendice C2\_Famiglia TORRI DI ASPIRAZIONE OA\_INTAKE TOWER

### CLaTa\_01

**Produttore:** TOP AIR\_ SÜDLUFT

**Fornitore:** Top-Air GmbH / Top-Air Italia

**Sede di produzione:** Italia

**Sito internet:** <https://www.top-air.it/it/Produkte/torri-di-ventilazione/>

**Contatti:** Top Air G.m.b.H, Geom. Hannes Kusstatscher, Rosmini Strasse 24 I-39100 Bozen (BZ), Tel: +39 380 5302266, Mail: [info@top-air.it](mailto:info@top-air.it), Mwst.- Nr: IT 02841040211  
PEC: [top.air.srl@legalmail.it](mailto:top.air.srl@legalmail.it), SDI: W7YVJK9, REA: BZ-210175

#### Descrizione del prodotto:

Le torri di ventilazione di SÜDLUFT dimostrano in modo convincente che funzionalità e design imponente non si escludono a vicenda. Con SL-SFERA introduciamo una nuova dimensione della progettazione edilizia. Le torri di ventilazione possono integrarsi armoniosamente nell'architettura complessiva oppure essere concepite come "opere d'arte" indipendenti e distintive, rappresentando una vera e propria espansione delle possibilità di pianificazione e realizzazione dei progetti. Anche l'utilizzo dell'energia geotermica risulta particolarmente interessante dal punto di vista energetico.

**Tipo di impiego:** edilizia/costruzione

**Costo:** -

**Allegati:** [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.top-air.it/wp-content/uploads/2016/12/ITA-SL-testo-cap-camino-a.d-scarico-senza-lamelle.pdf](https://www.top-air.it/wp-content/uploads/2016/12/ITA-SL-testo-cap-camino-a.d-scarico-senza-lamelle.pdf)



#### Classificazione per complessità di prodotto

- ☐ Materiale trattato industrialmente amorfo ☐ Semi-componente ☐ Prodotto edilizio completo  
☐ Materiale semilavorato ☐ Componente  
☐ Materiale e/o componente semilavorato a sistema ☒ Componente a sistema

#### Classificazione del sistema tecnologico\_ norma UNI8290

| Classi unità tecnologiche                                                                                                                                                                                            | Unità tecnologiche                                                                                             | Classi di elementi tecnici                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Struttura<br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici appartenenti al sistema edilizio aventi funzione di sostenere i carichi del sistema edilizio stesso e di collegare staticamente le sue parti. | struttura di fondazione<br>struttura di elevazione<br>struttura di contenimento                                | strutture di fondazione dirette<br>strutture di fondazione indirette<br>strutture di elevazione verticali<br>strutture di elev. orizzontali ed inclinate<br>strutture di elevazione spaziali<br>strutture di contenimento verticali<br>strutture di contenimento orizzontali |
| Chiusura<br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi in termini del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.        | chiusura verticale<br>chiusura orizzontale inferiore<br>chiusura orizz. su spazi esterni<br>chiusura superiore | pareti perimetrali verticali<br>infissi esterni verticali<br>solai a terra<br>infissi orizzontali<br>solai su spazi aperti<br>coperture<br>infissi esterni orizzontali                                                                                                       |
| Partizione interna<br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.                         | partizione interna verticale<br>partizione interna orizzontale<br>partizione interna inclinata                 | pareti interne verticali<br>infissi interni verticali<br>elementi di protezione<br>solai<br>soppalchi<br>infissi interni orizzontali<br>scale interne<br>rampe interne                                                                                                       |
| Partizione esterna<br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi esterni connessi con il sistema edilizio stesso.             | partizione esterna verticale<br>partizione esterna orizzontale<br>partizione esterna inclinata                 | elementi di protezione<br>elementi di separazione<br>balconi e logge<br>passerelle<br>scale esterne<br>rampe esterne                                                                                                                                                         |

#### Classe di Esigenze\_ norma UNI8290

| Sicurezza                      | Benessere                    | Affidabilità                            |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| Resistenza meccanica           | Tenuta all'acqua             | Resistenza ai fenomeni chimici e fisici |
| Resistenza a compressione      | Permeabilità all'aria        | Durata                                  |
| Resistenza a trazione          | Isolamento termico           | Fruibilità                              |
| Resistenza agli urti           | Comportamento igrometrico    | Attrezzabilità                          |
| Resistenza all'abrasione       | Isolamento acustico          | Manutenibilità                          |
| Comportamento al fuoco         | Emissione di sostanze nocive | Gestione                                |
| Resistenza agli agenti chimici | Ventilazione                 | Influenza sui consumi energetici        |
| Resistenza al gelo             | Aspetto                      |                                         |
| Stabilità dimensionale         | Regolarità di aspetto        |                                         |

#### Caratteristiche dimensionali ed eventuali pezzi speciali

| Codice             | SL-SFERA                     | Pezzi speciali                                                                                   |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dimensioni (L x H) | Su misura / secondo progetto | Testa a lamelle, scarico libero, lamelle cieche, camino angolare, collare anti-pioggia, drenaggi |

## CLaTa\_01

### Caratteristiche fisiche e termiche del prodotto

|                                                                                                                                                          |                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Materiale: Acciaio inox V2A 1.4301, V4A 1.4571, o acciaio S235 zincato |  Conducibilità termica $\lambda$ [W/mK]: $\approx 16$ |
|  Densità [kg/m <sup>3</sup> ]: $\sim 8000$                              |  Calore specifico [J/KgK]: $\sim 500$                 |
|  Peso [kg/m <sup>2</sup> ]: 310                                         |                                                                                                                                        |

### Proprietà meccaniche e resistenze

|                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza: Elevata (acciaio inox AISI 304 o 316Ti) secondo statica verificabile EN 1993-3-2 / EN 1998-6 |  Comportamento al fuoco: Euroclasse A1 (non combustibile) per inox/acciai; esempi e riferimenti EN 13501-1 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Proprietà di protezione e isolamento

|                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza agli agenti chimici: permeabilità al metano: Permeabilità pressoché nulla della lamiera metallica continua; la tenuta è determinata dai giunti e dalle guarnizioni. |  Permeabilità al vapore acqueo [g/m <sup>2</sup> /24h]: $\approx 0$ (la prestazione reale dipende dalle giunzioni) |
|  Tenuta all'acqua: Testa a lamelle con griglia anti-uccelli                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                     |

### Comportamento con variazioni di temperatura

|                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza al gelo: sì (metallo non sensibile al gelo; verificare solo drenaggi) |  Stabilità di forma a caldo: Ottima in esercizio HVAC; inox 304 l'integrità oltre le temperature tipiche di impianto. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Proprietà meccaniche specifiche

|                                                                                                                                                                      |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  Resistenza a trazione a rottura [L/T]: inox 304 con Rm 500–700 MPa.                |  |
|  Resistenza alla trazione delle giunzioni [L/T]: n/a                                |  |
|  Allungamento alla massima resistenza alla trazione: $\sim 45\%$ (A50) per AISI 304 |  |
|  Resistenza alla lacerazione (metodo del chiodo): n/a                               |  |

### Aspetto e durata

|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Colore: Polvere RAL (11 colori); anodizzato opzionale-Finitura Duplo K240 / pallinata vetro |  Durata: Alta |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Uso e Manutenzione

Se non utilizzata, pulire e coprire la matrice con un telo e un pannello rigido. Evitare disarmani e oggetti che possano danneggiarla. In caso di smontaggio, le matrici incollate con colla bicomponente sono difficili da rimuovere, mentre con colla monocomponente si può tentare con cura. Conservare le matrici in piano, possibilmente in zone ombreggiate.

### Sistema di fissaggio

|                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Su cassaforma in legno o metallo con colla o staffe |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Tempo medio di messa in opera

|                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|
|  1–2 ore |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|

### Distaccante

|                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Necessario – specifici agenti distaccanti consigliati |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Risorse umane

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### FASE della messa in opera

su piastra in c.a. con HVZ o su telaio di ancoraggio conforme DIN-EN 12220; collegamento verticale dal basso o bocchettone laterale; accessori: SL-RK (collare antipioggia), SL-ANK-VA/FV (telaio), mensole parete SL-WK-SCH

### Altre info

Attrezzi, accessori, dispositivi  
-Fratrone dentato per stesura colla 7x7mm  
-Spatola per stesura colla (consigliata)  
-Coltello con lama (25mm) maggiorata retrattile per taglio/rifilo matrice  
-Disco lamellare grana 40 per "carteggiatura" meccanica dorso matrice  
-Metro flessibile (8 mt)  
-Staggia in alluminio (misura a richiesta)  
-Pompa manuale nebulizzatrice per disarimate (8 litri €/pezzo)  
-Multiattrezzo taglio matrici e pulitura casseri (consigliato uno)  
-PLASDI' d iluente pulitura matrici tanica 10 L

### Immagini del prodotto



Fig.1\_ Torri di ventilazione cilindriche in acciaio inox con testa a lamelle orizzontali, integrate nel contesto architettonico urbano. Fonte: Top Air G.m.b.H. (2021). Torri di ventilazione. <https://www.top-air.it/it/Produkte/torri-di-ventilazione/>

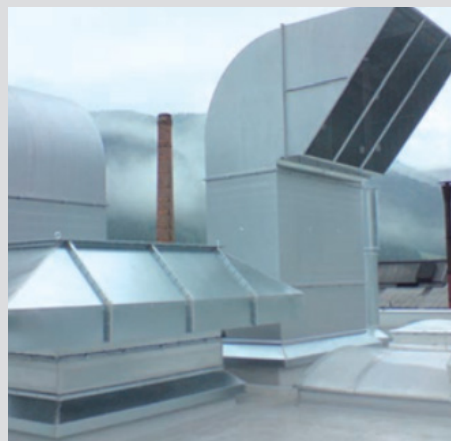


Fig.2\_ Installazione in copertura di terminali e torri di ventilazione metallici collegati alla rete aeraulica dell'edificio. Fonte: Top Air G.m.b.H. (2021). Torri di ventilazione. <https://www.top-air.it/it/Produkte/torri-di-ventilazione/>

# Analisi di mercato\_ esempio delle schede

## Appendice C3\_Famiglia\_MATERIALE MASSA TERMICA\_calcestruzzo MISCELA basso emissivo

### CLaC\_03a

**Produttore:** Mapei S.p.A.

**Fornitore:** Mapei S.p.A.

**Sede di produzione:** Italia (Latina, San Cesario sul Panaro, Modugno)

**Sito internet:** www.mapei.com

**Contatti:** Tel. +39 02 37673.1 – mapei@mapei.it



#### Descrizione del prodotto:

Additivo superfluidificante di nuova generazione appartenente al sistema CUBE di Mapei, sviluppato per la produzione di calcestruzzi a basse emissioni di CO<sub>2</sub> con cementi a ridotto clinker e aggregati riciclati. Migliora lavorabilità, resistenze meccaniche e durabilità del conglomerato.



**Tipo di impiego:** edilizia/costruzione



**Costo:** -

#### Allegati:

brochure CUBE System / schede tecniche Mapei



#### Classificazione per complessità di prodotto

☐ Materiale trattato industrialmente amorfo

☐ Materiale semilavorato

☒ Materiale e/o componente semilavorato a sistema

☐ Semi-componente

☐ Componente

☒ Componente a sistema

☐ Prodotto edilizio completo

#### Classificazione del sistema tecnologico\_ norma UNI8290

| Classi unità tecnologiche                                                                                                                                                                                                   | Unità tecnologiche               | Classi di elementi tecnici                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Struttura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici appartenenti al sistema edilizio aventi funzione di sostenere i carichi del sistema edilizio stesso e di collegare staticamente le sue parti. | struttura di fondazione          | strutture di fondazione dirette<br>strutture di fondazione indirette                                                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                             | struttura di elevazione          | strutture di elevazione verticali<br>strutture di elev. orizzontali ed inclinate<br>strutture di elevazione spaziali                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                             | struttura di contenimento        | strutture di contenimento verticali<br>strutture di contenimento orizzontali                                                                                           |
| <b>Chiusura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi in terni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.          | chiusura verticale               | pareti perimetrali verticali<br>infissi esterni verticali<br>solai a terra<br>infissi orizzontali<br>solai su spazi aperti<br>coperture<br>infissi esterni orizzontali |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura orizzontale inferiore   | pareti interne verticali<br>infissi interni verticali                                                                                                                  |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura orizz. su spazi esterni | elementi di protezione<br>solai<br>soppalchi<br>infissi interni orizzontali<br>scale interne<br>rampe interne                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                             | chiusura superiore               | elementi di protezione<br>elementi di separazione<br>balconi e logge<br>passerelle<br>scale esterne<br>rampe esterne                                                   |
| <b>Partizione interna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.                         | partizione interna verticale     |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione interna orizzontale   |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione interna inclinata     |                                                                                                                                                                        |
| <b>Partizione esterna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi esterni connessi con il sistema edilizio stesso.             | partizione esterna verticale     |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione esterna orizzontale   |                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                             | partizione esterna inclinata     |                                                                                                                                                                        |

#### Classe di Esigenze\_ norma UNI8290

| Sicurezza                      | Benessere                    | Affidabilità                            |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| Resistenza meccanica           | Tenuta all'acqua             | Resistenza ai fenomeni chimici e fisici |
| Resistenza a compressione      | Permeabilità all'aria        | Durata                                  |
| Resistenza a trazione          | Isolamento termico           |                                         |
| Resistenza agli urti           | Comportamento igrometrico    | <b>Fruibilità</b>                       |
| Resistenza all'abrasione       | Isolamento acustico          | Attrezzabilità                          |
| Comportamento al fuoco         | Emissione di sostanze nocive |                                         |
| Resistenza agli agenti chimici | Ventilazione                 | <b>Manutenzione</b>                     |
| Resistenza al gelo             |                              | Manutenibilità                          |
| Stabilità dimensionale         | <b>Aspetto</b>               | <b>Gestione</b>                         |
|                                | Regolarità di aspetto        | Influenza sui consumi energetici        |

#### Caratteristiche dimensionali ed eventuali pezzi speciali

Codice

Dimensioni (L x H)

SCHEDA n.1 CLaC\_03a

#### Caratteristiche fisiche e termiche del prodotto

|                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Materiale: miscela polimerica liquida (poliacrilati, polycarbossilati, lignosolfonati, naftalene/melamina solfonata, acqua, additivi secondari) |  Conducibilità termica $\lambda$ [W/mK]: / |
|  Densità [kg/m <sup>3</sup> ]: 1.000 – 1.600                                                                                                     |  Calore specifico [J/KgK]: /               |
|  Peso [kg/m <sup>2</sup> ]: /                                                                                                                    |                                                                                                                             |

#### Proprietà meccaniche e resistenza

|                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza: $\geq 110\%$ a 7 e 28 gg (plastificante) $\geq 140\%$ a 1 gg e $\geq 115\%$ a 28 gg (superfluidificante) |  Comportamento al fuoco: non applicabile direttamente (prodotto liquido additivo) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Proprietà di protezione e isolamento

|                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza agli agenti chimici _permeabilità al metano: non rilevante |                                                                                                                                                        |
|  Tenuta all'acqua: non rilevante                                       |  Permeabilità al vapore acqueo [g/m <sup>2</sup> /24h]: non rilevante |

#### Comportamento con variazioni di temperatura

|                                                                                                                                                  |                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza al gelo: indirettamente migliorativa del cls finale |  Stabilità di forma a caldo: / |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Proprietà meccaniche specifiche

|                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza a trazione a rottura [L/T]: /              |
|  Resistenza alla trazione delle giunzioni [L/T]: /     |
|  Allungamento alla massima resistenza alla trazione: / |
|  Resistenza alla lacerazione (metodo del chiodo): /    |

#### Aspetto e durata

|                                                                                                                              |                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Colore: marrone chiaro / grigio standard |  Durata: elevata se conservato correttamente |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Uso e Manutenzione

Additivo dosabile automaticamente in impianto o manualmente in cantiere. Non richiede manutenzione diretta.

#### Sistema di fissaggio

|                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Non applicabile |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Tempo medio di messa in opera

|                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  7–12 min/m <sup>2</sup> (getto spessore $\approx 20$ cm) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Distaccante

|                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Non applicabile |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Risorse umane



#### FASI della messa in opera

1. Dosaggio 0,4%–2% sul peso del cemento
2. Inserimento in autobetoniera o impianto di betonaggio
3. Miscelazione omogenea
4. Verifica slump/workability
5. Getto in opera
6. Riduzione vibrazione meccanica
7. Maturazione ordinaria

#### Altre info

##### Attrezzi, accessori, dispositivi

- Riduzione CO<sub>2</sub> ciclo di vita del calcestruzzo fino al 55%
- Compatibile con SCM, LC3 e aggregati riciclati
- Supporta protocolli LEED, CAM, BIM
- Migliora durabilità, qualità e controllo digitale del processo
- Parte integrante del sistema Mapei CUBE per il calcestruzzo sostenibile

#### Immagini del prodotto



Fig.1\_Packaging commerciale del prodotto



Fig.2\_Getto di calcestruzzo fluido additivato con superfluidificante di nuova generazione



Fig.3\_ Applicazione industriale nel calcestruzzo preconfezionato, per contestualizzare il prodotto nella filiera produttiva.



Fig.4\_ Branding del sistema CUBE per spiegare che il DYNAMON CUBE 800 fa parte di una gamma per calcestruzzi low-carbon.



# Analisi di mercato\_ esempio delle schede

## Appendice C4\_Famiglia\_MASSA TERMICA\_forma-matrice

### CLa\_04a

**Produttore:** PLASMACEM\_ Grecata B 0303  
**Fornitore:** Rekreo s.r.l.  
**Sede di produzione:** Vicenza, Italia  
**Sito internet:** <https://www.plasmacem.com/>  
**Contatti:** Tel. +39 0444 546968  
Fax +39 0444 1830461  
E-Mail [info@plasmacem.com](mailto:info@plasmacem.com)  
[PEC@rekreo.it](mailto:PEC@rekreo.it)



#### Descrizione del prodotto:

Il prodotto è una matrice speciale progettata per il calcestruzzo e gli elementi in cemento, caratterizzata da disegni personalizzati. Ogni matrice è realizzata con le stesse elevate caratteristiche meccaniche e tecniche delle soluzioni tradizionali, garantendo resistenza, durata e precisione. Si distingue per la sua capacità di offrire soluzioni esteticamente distinte e funzionali per la creazione di strutture in calcestruzzo e cemento di alta qualità.



**Tipo di impiego:** edilizia/costruzione



**Costo:** Per 50 riutilizzi indicativamente è di 198,00€/mq

#### Allegati:

<https://www.plasmacem.com/it/matrici-per-il-calcestruzzo-facciavista-prefabbricato-casseri-in-cemento/cp-6-matrici-per-il-calcestruzzo-architettonico>



#### Classificazione per complessità di prodotto

- ☐ Materiale trattato industrialmente amorfo ☐ Semi-componente ☐ Prodotto edilizio completo  
☐ Materiale semilavorato ☐ Componente  
☒ Materiale e/o componente semilavorato a sistema ☒ Componente a sistema

#### Classificazione del sistema tecnologico\_ norma UNI8290

| Classi unità tecnologiche                                                                                                                                                                                                   | Unità tecnologiche                                                                                             | Classi di elementi tecnici                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Struttura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici appartenenti al sistema edilizio aventi funzione di sostenere i carichi del sistema edilizio stesso e di collegare staticamente le sue parti. | struttura di fondazione<br>struttura di elevazione<br>struttura di contenimento                                | strutture di fondazione dirette<br>strutture di fondazione indirette<br>strutture di elevazione verticali<br>strutture di elev. orizzontali ed inclinate<br>strutture di elevazione spaziali<br>strutture di contenimento verticali<br>strutture di contenimento orizzontali |
| <b>Chiusura</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi in terni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.          | chiusura verticale<br>chiusura orizzontale inferiore<br>chiusura orizz. su spazi esterni<br>chiusura superiore | pareti perimetrali verticali<br>infissi esterni verticali<br>solai a terra<br>infissi orizzontali<br>solai su spazi aperti<br>coperture<br>infissi esterni orizzontali                                                                                                       |
| <b>Partizione interna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.                         | partizione interna verticale<br>partizione interna orizzontale<br>partizione interna inclinata                 | pareti interne verticali<br>infissi interni verticali<br>elementi di protezione<br>solai<br>soppalchi<br>infissi interni orizzontali<br>scale interne<br>rampe interne                                                                                                       |
| <b>Partizione esterna</b><br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi esterni connessi con il sistema edilizio stesso.             | partizione esterna verticale<br>partizione esterna orizzontale<br>partizione esterna inclinata                 | elementi di protezione<br>elementi di separazione<br>balconi e logge<br>passerelle<br>scale esterne<br>rampe esterne                                                                                                                                                         |

#### Classe di Esigenze\_ norma UNI8290

| Sicurezza                      | Benessere                    | Affidabilità                            |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| Resistenza meccanica           | Tenuta all'acqua             | Resistenza ai fenomeni chimici e fisici |
| Resistenza a compressione      | Permeabilità all'aria        | Durata                                  |
| Resistenza a trazione          | Isolamento termico           |                                         |
| Resistenza agli urti           | Comportamento igrometrico    | <b>Fruibilità</b>                       |
| Resistenza all'abrasione       | Isolamento acustico          | Attrezzabilità                          |
| Comportamento al fuoco         | Emissione di sostanze nocive |                                         |
| Resistenza agli agenti chimici | Ventilazione                 | <b>Manutenzione</b>                     |
| Resistenza al gelo             |                              | Manutenibilità                          |
| Stabilità dimensionale         | <b>Aspetto</b>               | <b>Gestione</b>                         |
|                                | Regolarità di aspetto        | Influenza sui consumi energetici        |

#### Caratteristiche dimensionali ed eventuali pezzi speciali

| Codice             | Str/0303- Grecata B | Flx/0303- Grecata B | Esx/0303- Grecata B         |
|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|
| Dimensioni (L x H) | 660 x 3500 mm       | 660 x 9200 mm       | 660 x 9200 mm / A richiesta |

### Caratteristiche fisiche e termiche del prodotto

|                                                                                                                                                      |                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Materiale: Poliuretano elastomerico flessibile ad alta definizione |                                                                                                                             |
|  Densità [kg/m3]: 485                                               |  Conducibilità termica $\lambda$ [W/mK]: / |
|  Peso [kg/m2]: 11,9                                                 |  Calore specifico [J/KgK]: /               |

### Proprietà meccaniche e resistenza

|                                                                                                                                                            |                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza: Meccanicamente flessibile, alta resistenza alla deformazione |  Comportamento al fuoco: Classe E |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Proprietà di protezione e isolamento

|                                                                                                                                                           |                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza agli agenti chimici _permeabilità al metano: Non applicabile |                                                                                                                                              |
|  Tenuta all'acqua: si, superficie non porosa                             |  Permeabilità al vapore acqueo [g/m2 /24h]: Non applicabile |

### Comportamento con variazioni di temperatura

|                                                                                                                                            |                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza al gelo: Flessibile anche a basse temperature |  Stabilità di forma a caldo: ~70-80 °C max |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Proprietà meccaniche specifiche

|                                                                                                                                                                                 |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  Resistenza a trazione a rottura [L/T]: Non indicata, materiale non strutturale                |  |
|  Resistenza alla trazione delle giunzioni [L/T]: /                                             |  |
|  Allungamento alla massima resistenza alla trazione: $\approx$ 300% tipico degli elastomeri PU |  |
|  Resistenza alla lacerazione (metodo del chiodo): Alta                                         |  |

### Aspetto e durata

|                                                                                                                                         |                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Colore: Grigio o su richiesta (per esigenze visive) |  Durata: Alta |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Uso e Manutenzione

Se non utilizzata, pulire e coprire la matrice con un telo e un pannello rigido. Evitare disarmenti e oggetti che possano danneggiarla. In caso di smontaggio, le matrici incollate con colla bicomponente sono difficili da rimuovere, mentre con colla monocomponente si può tentare con cura. Conservare le matrici in piano, possibilmente in zone ombreggiate.

### Sistema di fissaggio

|                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Su cassaforma in legno o metallo con colla o staffe |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Tempo medio di messa in opera

|                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|
|  1-2 ore |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|

### Distaccante

|                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Necessario – specifici agenti distaccanti consigliati |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Risorse umane



### FASI della messa in opera

1. Taglio e posizionamento matrice su cassaforma
2. Applicazione distaccante specifico
3. Posizionamento armature e getto calcestruzzo
4. Disarmo con attenzione dopo presa
5. Pulizia e stoccaggio per riutilizzo

### Altre info

#### Attrezzi, accessori, dispositivi

- Frattoni dentati per stesura colla 7x7mm
- Spatola per stesura colla (consigliata)
- Coltello con lama (25mm) maggiorata retrattile per taglio/rifilo matrice
- Disco lamellare grana 40 per "carteggiatura" meccanica dorso matrice
- Metro flessibile (8mt)
- Staggia in alluminio (misura a richiesta)
- Pompa manuale nebulizzatrice per disarmare (8 litri €/pezzo)
- Multiatrezzo taglio matrici e pulitura casseri (consigliato uno)
- PLASDI' diluente pulitura matrici tanica 10 L

### Immagini del prodotto

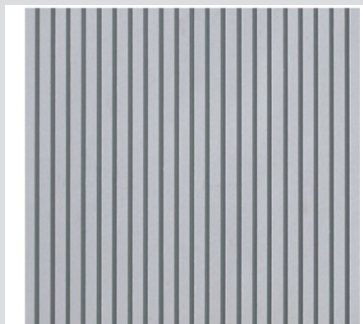


Fig.1 Vista frontale della matrice grecata B a rilievi lineari continui.



Fig.2 Sezione tecnica del profilo grecato B con quote dimensionali.



Fig.3 Applicazione della matrice su getto in calcestruzzo fresco.



Fig.4 Superficie in calcestruzzo disarmato con finitura grecata verticale.



# Analisi di mercato\_ esempio delle schede

## Appendice C5\_Famiglia\_ Componenti membrane Anti Radon

### CLaR\_06\_b

**Produttore:** Mapei S.p.A.

**Fornitore:** Mapei S.p.A.

**Sede di produzione:** Vicenza, Italia

**Sito internet:** www.mapei.com

**Contatti:** assistenza tecnica Mapei Italia



#### Descrizione del prodotto:

Sistema di membrane impermeabilizzanti e anti-radon fully-bonded per strutture interrate, fondazioni e pareti controterra. Soluzioni continue ad alta adesione progettate per impedire infiltrazioni d'acqua e passaggio di gas dal terreno (radon e metano).



**Tipo di impiego:** edilizia/costruzione



**Costo:** non dichiarato

#### Allegati:

schede tecniche Mapei / documentazione prodotto



#### Classificazione per complessità di prodotto

☐ Materiale trattato industrialmente amorfo

☐ Materiale semilavorato

☐ Materiale e/o componente semilavorato a sistema

☐ Semi-componente

☐ Componente

☒ Prodotto edilizio completo

☒ Componente a sistema

#### Classificazione del sistema tecnologico\_ norma UNI8290

| Classi unità tecnologiche                                                                                                                                                                                            | Unità tecnologiche               | Classi di elementi tecnici                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Struttura<br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici appartenenti al sistema edilizio aventi funzione di sostenere i carichi del sistema edilizio stesso e di collegare staticamente le sue parti. | struttura di fondazione          | strutture di fondazione dirette<br>strutture di fondazione indirette                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                      | struttura di elevazione          | strutture di elevazione verticali<br>strutture di elev. orizzontali ed inclinate<br>strutture di elevazione spaziali |
|                                                                                                                                                                                                                      | struttura di contenimento        | strutture di contenimento verticali<br>strutture di contenimento orizzontali                                         |
| Chiusura<br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi in terni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.          | chiusura verticale               | pareti perimetrali verticali<br>infissi esterni verticali<br>solai a terra                                           |
|                                                                                                                                                                                                                      | chiusura orizzontale inferiore   | infissi orizzontali                                                                                                  |
|                                                                                                                                                                                                                      | chiusura orizz. su spazi esterni | solai su spazi aperti                                                                                                |
| Partizione interna<br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.                         | chiusura superiore               | coperture                                                                                                            |
|                                                                                                                                                                                                                      | partizione interna verticale     | infissi esterni orizzontali<br>pareti interne verticali<br>infissi interni verticali                                 |
|                                                                                                                                                                                                                      | partizione interna orizzontale   | elementi di protezione<br>solai                                                                                      |
| Partizione esterna<br>Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di dividere e conformare gli spazi esterni connessi con il sistema edilizio stesso.             | partizione interna inclinata     | soppalchi<br>infissi interni orizzontali                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                      | partizione esterna verticale     | scale interne<br>rampe interne                                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                                      | partizione esterna orizzontale   | elementi di protezione<br>elementi di separazione                                                                    |
|                                                                                                                                                                                                                      | partizione esterna inclinata     | balconi e logge<br>passerelle<br>scale esterne<br>rampe esterne                                                      |

#### Classe di Esigenze\_ norma UNI8290

| Sicurezza                      | Benessere                    | Affidabilità                            |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| Resistenza meccanica           | Tenuta all'acqua             | Resistenza ai fenomeni chimici e fisici |
| Resistenza a compressione      | Permeabilità all'aria        | Durata                                  |
| Resistenza a trazione          | Isolamento termico           | Fruibilità                              |
| Resistenza agli urti           | Comportamento igrometrico    | Attrezzabilità                          |
| Resistenza all'abrasione       | Isolamento acustico          | Manutenzione                            |
| Comportamento al fuoco         | Emissione di sostanze nocive | Manutenibilità                          |
| Resistenza agli agenti chimici | Ventilazione                 | Gestione                                |
| Resistenza al gelo             | Aspetto                      | Influenza sui consumi energetici        |
| Stabilità dimensionale         | Regolarità di aspetto        |                                         |

#### Caratteristiche dimensionali ed eventuali pezzi speciali

Codice

Dimensioni (L x H)

#### Caratteristiche fisiche e termiche del prodotto

|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Materiale: bitume modificato in dispersione acquosa / membrane polimeriche accoppiate |  Conducibilità termica $\lambda$ [W/mK]: / |
|  Densità [kg/m3]: 1350                                                                 |  Calore specifico [J/KgK]: /               |
|  Peso [kg/m2]: 2,7 (a 2 mm spessore)                                                   |                                                                                                                             |

#### Proprietà meccaniche e resistenze

|                                                                                                                                                                      |                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza: elevata adesione, resistenza a trazione e pressioni idrauliche dirette |  Comportamento al fuoco: non classificata |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Proprietà di protezione e isolamento

|                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza agli agenti chimici _permeabilità al metano: resistente, progettata contro gas metano |  Permeabilità al vapore acqueo [g/m2 /24h]: molto bassa |
|  Tenuta all'acqua: molto alta                                                                     |                                                                                                                                          |

#### Comportamento con variazioni di temperatura

|                                                                                                                             |                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Resistenza al gelo: nessuna fessura a 0°C |  Stabilità di forma a caldo: nessuno scorrimento a 70°C |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Proprietà meccaniche specifiche

|                                                                                                                                                                      |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  Resistenza a trazione a rottura [L/T]: 250-400%                                    |  |
|  Resistenza alla trazione delle giunzioni [L/T]: elevata se correttamente sigillate |  |
|  Allungamento alla massima resistenza alla trazione: buona                          |  |
|  Resistenza alla lacerazione (metodo del chiodo): buona                             |  |

#### Aspetto e durata

|                                                                                                  |                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Colore: nero |  Durata: Alta |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Uso e Manutenzione

Non richiede manutenzione se protetta e correttamente installata prima del reinterro.

#### Sistema di fissaggio

|                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Adesione diretta al supporto, nessun fissaggio meccanico necessario. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Tempo medio di messa in opera

|                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  ~1 giornata / 100 m <sup>2</sup> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Distaccante

|                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Non necessario |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Risorse umane



#### FASI della messa in opera

1. Preparazione del supporto
2. Pulizia e primerizzazione
3. Applicazione in due mani / posa membrana
4. Controllo spessore minimo 1,5 mm secco
5. Protezione prima del reinterro
6. Sigillatura dettagli costruttivi e giunti

#### Altre info

##### Attrezzi, accessori, dispositivi

- Conforme come barriera al radon
- Idonea per fondazioni, platee, muri controterra, vasche
- Membrana continua senza giunzioni deboli (nei sistemi liquidi)
- Eco-compatibile, a base acqua, senza solventi volatili
- Elevata durabilità in ambienti interrati

#### Immagini del prodotto



Fig.1\_Membrane impermeabilizzanti autoadesive MAPETHE-NE e sistemi fully-bonded Mapei impiegati per la protezione di fondazioni e strutture controterra, con funzione di barriera all'acqua e ai gas del sottosuolo (radon e metano).



Fig.-

## 0.7 Organizzazione della ricerca generale dottorale

### *Attività scientifica e di ricerca*

- Membro del Gruppo di ricerca universitario per il Progetto “Misure di sostegno e piani di gestione dei Siti UNESCO: Appia Regina Viarum” Responsabile UR Roma Sapienza: prof. Fabrizio Tucci Membri UR Roma Sapienza: Arch. PhD V. Cecafofso, Arch. PhD P. Altamura, Arch. PhD G. Turchetti, Arch. PhD M. Azzella, Arch. PhD M. Giampaoletti, Arch. C. Dalsasso, Arch. L.M. Giannini, Arch. F. Nava, Arch. M.M. Pani, Arch. V. Tulelli Ruolo: Dottoranda, Periodo: 2022

### *Seminari scientifici e corsi di formazione specialistica frequentati nell'ambito del Dottorato*

- “Rigenerare la città per governare il territorio. Dalle periferie alla nuova questione urbana. Il caso del VII Municipio del Comune di Roma” dell’On. Roberto Morassut, presso l’Aula Magna Bruno Zevi, Facoltà di Architettura, 12 novembre 2024.
- “Vittoria Calzolari e la sua Scuola. Pensare la città e il territorio attraverso il paesaggio”, organizzato dalla Scuola di Specializzazione in Beni Naturali e Territoriali in collaborazione con il Dottorato PDTA, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA, 28 novembre 2024.
- “Changes by Design. Immaginari, Archivi e Ritualità nella Comunicazione d’Impresa”, organizzato dal Curriculum di Design, presso l’Aula degli Organi Collegiali del Rettorato, Sapienza Università di Roma, 3 marzo 2025.
- “Turismo e Aree protette. Tutela e fruizione per una gestione integrata”, organizzato dal Dottorato PDTA e dal Master CNAAPP, presso l’Aula Y3 – Via Mariano Fortuny 1, 23 giugno 2025.

### *Partecipazione a convegni, forum e incontri di approfondimento scientifico*

- “Capitale Naturale e Aree Protette. Competenze, percorsi formativi e nuove professionalità per governare la complessità”, organizzato dal Master CNAAPP, Federparchi e AIDAP con il Dottorato PDTA, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA, 14 dicembre 2023.

### *Riunioni di coordinamento scientifico e attività dei tavoli tematici del Progetto Rome Technopole*

- Riunione Green City Network – “Carta per le Nature Positive Cities”, organizzata dalla Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile e dal Green City Network, in modalità Zoom, 26 marzo 2024.

### *Workshop scientifici e attività laboratoriali di carattere progettuale e interdisciplinare*

- “Patrimonio culturale e welfare urbano. Strategie, Piani e Progetti per la rigenerazione della città contemporanea”, organizzato dal Coordinatore del Dottorato Prof. Arch. Laura Ricci, presso l’Aula Piccinato e Aula Master del Dipartimento PDTA, 9–10 maggio 2024.
- “Patrimonio culturale e welfare urbano. Strategie, Piani e Progetti per la rigenerazione della città contemporanea”, organizzato dal Coordinatore del Dottorato Prof. Arch. Laura Ricci, presso l’Aula Master del Dipartimento PDTA, 13–17 maggio 2024.
- “Patrimonio culturale e welfare urbano. Strategie, Piani e Progetti per la rigenerazione della città contemporanea”, organizzato dal Coordinatore del Dottorato Prof. Arch. Laura Ricci, presso l’Aula Piccinato del Dipartimento PDTA, 20 maggio 2024.

