

Università degli Studi di Roma “La Sapienza”
Facoltà di Architettura
DATA - Dipartimento di Design, Tecnologia dell'Architettura, Territorio e Ambiente

Dottorato di Ricerca in Progettazione Ambientale
XXIII ciclo: novembre 2007 - ottobre 2010
Coordinatore: Prof.ssa Eliana Cangelli

TESI DI DOTTORATO:

**I SISTEMI DI CONTROLLO PASSIVO NELLA VALUTAZIONE
DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI IN AREA
MEDITERRANEA.**

**Applicazioni delle simulazioni dinamiche nella progettazione e nella
certificazione energetica degli edifici.**

PhD DISSERTATION

**THE PASSIVE CONTROL SYSTEMS IN THE ASSESSMENT OF ENERGY
PERFORMANCE OF BUILDINGS IN THE MEDITERRANEAN AREA.**

Applications of dynamic simulations in the design and in the energy certification of buildings

Dottorando: Arch. Marco Cimillo

Tutor: Prof. Salvatore Dierna
Prof. Fabrizio Tucci

- ABSTRACT -

La tesi contiene un quadro dei problemi legati alla valutazione del contributo dei sistemi passivi nella valutazione dell'efficienza energetica degli edifici e propone due contributi. Entrambi sono basati sull'uso delle simulazioni dinamiche, ma prevedono diversi approcci: un modello dinamico è validato secondo lo standard europeo EN 15265 e un metodo di calcolo semplificato è elaborato per il sistema dei condotti interrati.

Le soluzioni sono immediatamente utilizzabili per la certificazione energetica e più in generale per la valutazione dei sistemi passivi. Inoltre vengono fornite indicazioni sulla validità dei due metodi sperimentati.

Si tratta tuttavia di soluzioni parziali che certamente non esauriscono il problema e che si prestano ad ulteriori sviluppi, sia riguardo alla propria accuratezza ed affidabilità, sia in relazione alle norme tecniche alle quali si rapportano.

The research maps out a description of the problems linked to the assessment of the energy performance of buildings in relation to the use of passive systems and proposes two contributions. Both are founded on dynamic simulation, but based on different approaches: a dynamic model is validated according to EN 15265 European standard and a simplified calculation procedure is generated for buried earth pipes systems.

The solutions are immediately usable for energy certification and for passive systems assessment in general. Furthermore, indications on the validity of two experimented methods are provided.

The solutions do not exhaust the problem and remain open to further developments, concerning both the accuracy/reliability of methods and the relations with the standards they are linked to.

Sommario

Introduzione: inquadramento della tematica e obiettivi della ricerca.....	7
<i>Sviluppo sostenibile, sicurezza energetica ed efficienza in energetica in edilizia</i>	8
<i>Obiettivi e struttura della ricerca</i>	10
PARTE I: INQUADRAMENTO	11
1. La certificazione energetica: quadro legislativo e normativo, limiti e potenzialità.....	13
<i>Politiche europee sull'efficienza energetica in edilizia</i>	14
<i>Evoluzione normativa in Italia</i>	16
2. L'efficienza energetica e i sistemi passivi in architettura.....	19
<i>Generalità dei sistemi passivi e contributi all'efficienza energetica in edilizia</i>	20
<i>Criteri di progettazione e ruolo delle simulazioni dinamiche</i>	27
3. Le metodologie di calcolo per la certificazione energetica	29
<i>Stato dell'arte</i>	30
<i>Limiti delle metodologie in uso</i>	37
PARTE II: IMPOSTAZIONE DEL PROBLEMA	39
4. La simulazione dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici	41
<i>Introduzione</i>	42
<i>Funzionamento</i>	46
<i>Applicazioni</i>	55
<i>Una selezione critica di software</i>	59
5. Casi applicativi: la valutazione di alcuni sistemi passivi	63
<i>Metodologia di valutazione</i>	64
<i>Potenzialità dei sistemi passivi e applicazioni delle simulazioni dinamiche in area mediterranea</i>	65
6. Possibilità di inclusione dei sistemi passivi nella valutazione delle prestazioni energetiche: due strategie alternative	107
<i>Applicazione diretta delle simulazioni dinamiche</i>	108
<i>Le simulazioni dinamiche come supporto a metodi stazionari o quasi stazionari</i>	110
PARTE III: RICERCA	111
7. La validazione di un metodo di simulazione dinamica	113
<i>Procedura di validazione secondo la norma UNI EN 15265</i>	114
<i>Descrizione dei test di riferimento</i>	117
<i>Assunti di base ed elementi problematici</i>	120
8. Rapporto di Validazione di EnegyPlus (UNI EN 15265).....	123
<i>Caratteristiche del software, assunti di base e risultati generali</i>	124
<i>Dati di input</i>	139
<i>Risultati di output</i>	143
9. Le simulazioni dinamiche per lo sviluppo di metodi di calcolo semplificati	155
<i>Simulazioni dinamiche come strumento di ricerca</i>	156
<i>Regressioni statistiche</i>	158
10. Un caso applicato esemplificativo: la valutazione dei condotti interrati	161
<i>Descrizione della procedura applicata</i>	162
<i>Applicazione della procedura e risultati</i>	166
Conclusioni: sintesi dei risultati e possibili sviluppi futuri della ricerca	173
<i>Sintesi dei principali risultati ottenuti</i>	174
<i>Possibili sviluppo futuri della metodologia e delle sue potenzialità applicative</i>	175

<i>APPARATI</i>	177
Appendici.....	178
<i>A. Dettaglio dei dati di input per i test di validazione</i>	178
<i>B. Dettaglio dei dati di output per i test di validazione</i>	195
<i>C. Dettaglio dei dati di input per le regressioni statistiche</i>	241
Bibliografia.....	261
<i>La simulazione dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici</i>	261
<i>I sistemi passivi in architettura</i>	262
<i>Riferimenti legislativi e normativi</i>	263

Introduzione: inquadramento della tematica e obiettivi della ricerca

La tematica della ricerca viene inquadrata nell'ambito del percorso culturale e politico del concetto di sviluppo sostenibile e delle politiche dell'Unione Europea. Queste ultime, perseguendo oltre alla sostenibilità, la sicurezza e la competitività del sistema energetico, impongono agli edifici obiettivi rigorosi in termini di efficienza e risparmio ("negawatt"), che diverranno ancor più pressanti nella prospettiva degli "edifici a energia quasi zero". A tali obiettivi, sostenuti dal sistema di certificazione energetica, possono dare un apporto notevole (e molto coerente con le strategie comunitarie) i sistemi passivi, la cui progettazione e valutazione presentano però tuttora elementi problematici alla cui soluzione la ricerca si propone di offrire un contributo.

Introduction: context and objectives of the research

The subject of the research is contextualized in the cultural and political path of the sustainable development concept and of the European energy policy. As the latter pursues safety and competitiveness of energy systems, besides sustainability, buildings are requested to reach notable targets in terms of efficiency and saving ("negawatt"). Furthermore, in the perspective of "nearly zero energy buildings", these goals, supported by energy certification systems, are intended to become even stricter. Passive systems can offer a remarkable contribution in this direction but still maintain problematic features in design and assessment. The research is aimed to contribute to their solution.

Sviluppo sostenibile, sicurezza energetica ed efficienza in energetica in edilizia

L'attuale sistema di certificazione energetica deriva da un lungo percorso culturale e normativo di livello internazionale del quale si delineano qui le tappe fondamentali.

Nel 1972 viene pubblicato uno studio sulla limitatezza delle risorse naturali necessarie alla sopravvivenza dell'uomo, commissionato al Massachusetts Institute of Technology dal Club di Roma. La ricerca, intitolata *The limits to growth*, si fonda sull'analisi di un modello (*World3*) che simula disponibilità e sfruttamento delle risorse sul pianeta in base allo sviluppo delle attività umane e della crescita demografica e predice una serie di potenziali gravi crisi nell'arco di un secolo. La pubblicazione, che attira il clamore internazionale sul tema, viene considerata una pietra miliare, ma è solo il culmine dell'attività del Club, che a sua volta rappresenta una delle espressioni avanzate di un movimento di pensiero ambientalista molto più ampio, sviluppatosi a partire dagli anni '60 (particolarmente significativa fu la pubblicazione del saggio sull'uso indiscriminato dei pesticidi *Silent spring*, di Rachel Carson, che pur affrontando un problema specifico -a differenza dello studio del MIT- è considerato un manifesto ed un'opera fondativa del movimento).

Se tutto ciò pose le basi culturali e preparò il terreno all'acquisizione del problema nella coscienza comune e politica, gli eventi che diedero un riscontro concreto e non più eludibile alla questione della disponibilità delle risorse furono poi le crisi energetiche conseguenti alle tensioni geopolitiche mediorientali. A partire da questi eventi si sviluppò anche un corpus di ricerche e letteratura (compreso l'inizio degli studi sulle simulazioni dinamiche) che diede ulteriore slancio al movimento, fino a portare, nel 1983, alla costituzione presso le Nazioni Unite di una *Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (WCED)* guidata da Gro Harlem Brundtland. Quattro anni più tardi il rapporto della commissione, *Our common future*, sancì ufficialmente la necessità di modificare l'interazione dell'uomo con il suo ambiente nel senso di uno *Sviluppo Sostenibile*, definito come quello in grado di soddisfare i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni.¹ L'elaborazione di tale concetto può considerarsi come un punto di arrivo culturale, ma più di tutto rappresenta il punto di partenza di una nuova fase economica e politica nella quale, se pur con enormi e prevedibili difficoltà, lo sviluppo sostenibile viene pressoché unanimemente indicato come il principale obiettivo da raggiungere. Il concetto è infatti talmente pregnante da ispirare una successiva serie di politiche, trattati internazionali e legislazioni nazionali e diventa così radicato da essere espressamente richiamato (con citazione per esteso) perfino nelle recenti leggi regionali italiane per l'edilizia sostenibile.

Tali leggi, che definiscono l'ultimo livello del sistema di certificazione energetica e ambientale degli edifici, scaturiscono appunto da una serie piramidale di livelli superiori di leggi statali - direttive europee - trattati internazionali che prendono le mosse dalla fondamentale *Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente e lo sviluppo (UNCED, in piena assonanza con il nome della commissione del 1983)*, tenutasi a Rio de Janeiro nel giugno del 1992 e meglio nota come *Earth Summit*. Il vertice approvò un importante piano di azione per lo sviluppo sostenibile, *Agenda 21*, e sancì la formazione di tre *Convenzioni Quadro* sui cambiamenti climatici, sulla biodiversità e sulla lotta alla desertificazione, articolando il concetto di sviluppo sostenibile in diversi temi chiave, tra i quali il primo risulta di maggior interesse ai fini della ricerca.

¹ “1. Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. [...]

2. Thus the goals of economic and social development must be defined in terms of sustainability in all countries - developed or developing, market-oriented or centrally planned. [...]

3. Development involves a progressive transformation of economy and society. [...]”

La Convenzione sui cambiamenti climatici, nella sua terza *Conferenza delle Parti*, riunitasi in Giappone quattro anni più tardi, stipulò un trattato per la riduzione delle emissioni clima-alternati, il *Protocollo di Kyoto*, entrato in vigore nel 2005. Fu proprio questo accordo a segnare il salto di qualità dalle semplici dichiarazioni di principio agli impegni vincolanti per gli stati e ad essere fra le principali fonti ispiratrici della politica europea in materia (ancora prima della sua entrata in vigore).

La seconda forte spinta ad una rigorosa ed organica legislazione continentale viene dalla ricerca della *sicurezza energetica* e della *competitività economica*.² L'Europa, che nel 2000 importava il 50% del proprio fabbisogno energetico e rischia di arrivare al 70% nel 2020³, preso atto che la sua forte dipendenza dall'esterno la pone in una condizione di vulnerabilità, ha individuato il risparmio e l'efficienza energetica come la più importante scelta strategica di settore - "*I "negawattora" (ovvero il mancato consumo di energia grazie al risparmio) sono divenuti la più importante risorsa energetica individuale*"⁴ ponendosi l'ambizioso obiettivo di ridurre del 20% i consumi di energia primaria entro il 2020.

Inoltre le direttive sulle prestazioni energetiche degli edifici, che citano esplicitamente sia il Protocollo di Kyoto che il problema della sicurezza energetica, mettono in evidenza nelle loro premesse come il 40% dell'energia totale dell'Unione venga consumata proprio dagli edifici, giustificando con ciò la particolare attenzione rivolta al settore e l'enorme responsabilità che su di esso ricade per il raggiungimento degli obiettivi programmati e più in generale per il conseguimento di uno sviluppo davvero sostenibile.

I principali meccanismi di promozione dell'efficienza energetica degli edifici messi a punto dalla direttiva di riferimento (2002/91/CE, ora sostituita dalla 2010/31/UE) sono la fissazione di requisiti minimi ed il sistema di *certificazione energetica*. Il primo impone uno standard di prestazione che assicura un miglioramento minimo dell'efficienza del parco edilizio man mano che lo stesso viene ampliato e rinnovato, mentre il secondo è pensato per incentivare nel mercato la diffusione di soluzioni di qualità più elevata, incoraggiando un generale progresso tecnologico del settore ed una sensibilizzazione dell'utenza. Accanto a questi strumenti fondamentali, una diversa direttiva, dedicata più in generale all'efficienza degli usi finali di energia ed ai servizi energetici (2006/32/CE), introduce le *diagnosi energetiche*, procedure più specificamente conoscitive, volte a fornire informazioni sulle opportunità di risparmio energetico, anche in riferimento alla convenienza economica degli investimenti. Procedure e metodi per la certificazione e la diagnosi energetica devono essere regolamentati a livello nazionale o regionale in base a caratteristiche e requisiti indicati nelle direttive stesse, tra i quali è esplicitamente indicata la capacità di valutare il contributo dei sistemi passivi. Il processo di regolamentazione in Italia è tuttora in atto e prevede comunque aggiornamenti continui nel prossimo futuro. Al momento la possibilità di valutare correttamente i sistemi passivi non è del tutto garantita, nonostante questi rappresentino un'ottima opportunità di risparmio energetico e siano perfettamente in linea con lo spirito delle politiche sopra enunciate. L'architettura passiva infatti interviene *a monte* dei fabbisogni impiantistici, utilizzando forme di energia rinnovabile direttamente nell'edificio o prevenendo le condizioni che determinano le necessità della climatizzazione artificiale. Producendo quindi proprio i *negawatt* indicati dalla Commissione Europea come strumento strategico per la sicurezza e la sostenibilità del sistema energetico continentale.

² Comunicazione della Commissione del 13 novembre 2008 intitolata «Efficienza energetica: conseguire l'obiettivo del 20%»

³ Libro verde della Commissione del 29 novembre 2000: "Verso una strategia europea di sicurezza dell'approvvigionamento energetico"

⁴ Comunicazione della Commissione del 13 novembre 2008 intitolata «Efficienza energetica: conseguire l'obiettivo del 20%»

Obiettivi e struttura della ricerca

In Italia il quadro legislativo e la recente normazione tecnica a supporto della certificazione energetica incentrano la propria attenzione sull'efficienza degli impianti e, per ciò che riguarda l'involucro architettonico, sulle misure di contenimento delle dispersioni termiche in inverno e di prevenzione dei carichi solari in estate. La norma internazionale di riferimento, pubblicata (in inglese) in Italia come UNI EN ISO 13790 contiene delle indicazioni limitatamente ad alcuni sistemi a guadagno indiretto. Tali indicazioni non sono state però recepite dalle specifiche tecniche italiane, UNI 11300 TS, richiamate nella legislazione nazionale come metodologia ufficiale di calcolo. Le potenzialità dei sistemi passivi non sembrano pertanto adeguatamente considerate e i miglioramenti delle prestazioni energetiche del sistema edificio impianto derivanti dall'utilizzo di tali sistemi non trovano riconoscimento in sede di certificazione energetica. Considerando che l'introduzione delle classi energetiche è stata motivata soprattutto dalla conseguente valorizzazione economica degli edifici energeticamente efficienti (che acquistano una maggiore appetibilità sul mercato), la situazione descritta inibisce di fatto lo sviluppo e la diffusione dei sistemi passivi. Per di più alcuni dispositivi, non potendo essere correttamente valutati, rischiano di risultare addirittura in contrasto con parte delle prescrizioni vigenti.

Obiettivo primario della ricerca di tesi è offrire un contributo all'inclusione di tali tecnologie nel processo di valutazione ai fini della certificazione energetica e più in generale alla più semplice valutazione dei sistemi passivi nei processi di progettazione e/o diagnosi energetica degli edifici.

Alcune delle caratteristiche intrinseche dei sistemi passivi determinano delle difficoltà oggettive che probabilmente sono alla base delle carenze nelle procedure attuali. Il funzionamento strettamente dipendente dai fattori climatici e dalle condizioni specifiche del sito, la mancanza di standardizzazione, la scarsa diffusione e le conseguenti difficoltà ad ottenere dei riscontri sulle performance reali dei sistemi, la possibilità di un controllo solo parziale da parte degli utenti sono alcune di queste. Tali peculiarità rappresentano un problema soprattutto perché rendono più difficoltosa l'elaborazione di una metodologia di semplice applicazione e di validità generale, come sarebbe opportuno in una procedura di certificazione energetica.

Uno degli strumenti che potrebbe trovare applicazione in tale campo è quello delle simulazioni dinamiche informatizzate. Si tratta di una delle metodologie più avanzate attualmente disponibili e consente di tenere nella giusta considerazione tutte le variabili coinvolte nel funzionamento dei sistemi passivi. In altri stati, come la Germania e la California, le simulazioni dinamiche sono già riconosciute come metodologie per la verifica di conformità alle normative energetiche. In Italia allo stato attuale manca invece una procedura riconosciuta che ne renda l'utilizzo sufficientemente uniforme e trasparente o in alternativa la validazione di software accessibili. La rimozione di tali ostacoli potrebbe rendere la metodologia direttamente applicabile alla certificazione energetica. Una soluzione alternativa può essere invece quella di un'applicazione indiretta, che prevede l'introduzione di procedure di calcolo semplificate, elaborate sulla scorta di ricerche basate sulle simulazioni dinamiche, da integrare nelle attuali metodologie di calcolo.

Il principali risultati attesi dalla studio, che indaga le due soluzioni descritte, sono dunque:

- la predisposizione di metodi per l'integrazione della valutazione dei sistemi passivi nelle procedure di calcolo finalizzate alla certificazione energetica;
- la verifica delle possibili applicazioni delle simulazioni dinamiche come strumento di indagine scientifica e di certificazione energetica.

La ricerca si rivolge principalmente agli altri ricercatori del campo ed ai soggetti tecnici coinvolti del processo di legislazione e normazione in materia di certificazione energetica. Più in generale i risultati possono essere di interesse per tutti gli attori implicati nel processo di certificazione, compresi gli sviluppatori di software commerciali prodotti a tale scopo.

PARTE I: INQUADRAMENTO

Sono analizzati il quadro normativo e tecnico della certificazione energetica ed i sistemi di controllo passivo. Le difficoltà legate alla certificazione ed in generale alla valutazione degli stessi rendono tali sistemi poco competitivi e di difficile progettazione.

PART I: INTRODUCTION

Passive systems and normative and technical framework of energy certification are analyzed. Problems related to certification and assessment in general make these systems little competitive and difficult to design.

1. La certificazione energetica: quadro legislativo e normativo, limiti e potenzialità

Sono delineati lo sviluppo ed l'assetto del sistema di certificazione energetico a partire dalle direttive europee e dalle norme tecniche internazionali, fino alla legislazione e normazione italiana. Sono individuate alcuni ritardi e criticità a livello nazionale.

1. Energy certification: legislative and normative framework, limits and potential

Development and structure of energy certification systems are outlined starting from European directives to the Italian regulation and standardization. Some delays and criticalities are identified at the national level.

Politiche europee sull'efficienza energetica in edilizia

La politica energetica europea, già delineata nell'introduzione, è sostanziata principalmente in due importanti direttive dedicate alle prestazioni degli edifici ed all'efficienza del sistema energetico nel suo complesso.

La prima, n. 2002/91/CE, meglio nota come *Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)* è alla base della corrente legislazione di settore in Italia come negli altri stati comunitari. Dopo aver premesso il ruolo strategico degli edifici e averne definito il rendimento energetico⁵, la direttiva si propone di promuoverne il miglioramento attraverso dei requisiti minimi da imporre agli immobili nuovi o ristrutturati in maniera significativa, e attraverso un sistema di certificazione energetica capace di informare e sensibilizzare i consumatori. Così facendo, gli edifici più efficienti possono ottenere più alte quotazioni mercato, giustificando i maggiori investimenti di capitale necessari a realizzarli con prestazioni anche superiori a quelle minime richieste.

Agli stati è lasciata facoltà di escludere dagli obblighi monumenti, luoghi di culto ed edifici poco significativi dal punto di vista energetico (edifici temporanei, agricoli etc.).

L'Italia ha recepito la direttiva *EPBD* con il D.Lgs. 192/2005 (e con successive modifiche e decreti attuativi).

Lo strumento centrale del sistema è individuato nell'*Attestato di Certificazione Energetica* che contiene informazioni chiare, di facile comprensione e corredate da valori di riferimento in merito al rendimento energetico dell'edificio. Lo stesso documento, di validità limitata a dieci anni, deve inoltre obbligatoriamente includere le possibili misure per il miglioramento delle prestazioni ed una stima economica dei relativi costi e benefici. Tali informazioni dovrebbero incoraggiare all'esecuzione di migliorie soprattutto gli acquirenti e affittuari di edifici costruiti negli scorsi decenni, caratterizzati da alti consumi energetici e ampissimi margini di miglioramento sia relativamente agli involucri edilizi che agli impianti di climatizzazione. Quest'ultimo meccanismo è al momento fortemente depotenziato in Italia.

Un punto critico, regolato dalla direttiva è dunque il metodo da utilizzare per il calcolo del rendimento energetico, principale garanzia (insieme all'indipendenza e competenza dei certificatori) di un sistema corretto e trasparente. Il problema presenta un notevole livello di complessità ed è rimandato nella sua completa definizione al livello nazionale o regionale, che deve comunque basarsi su un quadro comune che comprende una serie di elementi da tenere in considerazione. Tale quadro comune prevede espressamente l'esigenza di considerare nel calcolo la presenza di sistemi passivi per il riscaldamento, la protezione solare, la ventilazione e l'illuminazione naturali. Al momento le indicazioni elencate sono solo parzialmente recepite in Italia.

La seconda direttiva n. 2006/32/CE, si pone l'obiettivo di un risparmio del 9% in 9 anni, da raggiungere attraverso una serie di provvedimenti mirati alla rimozione delle barriere giuridiche, finanziarie e di ogni altra natura che ostacolano un uso efficiente dell'energia, allo sviluppo di un mercato dei servizi energetici ed al coinvolgimento del settore pubblico, al quale è richiesto di svolgere un *ruolo esemplare*. Pur trattandosi di strategie generali, molti degli strumenti messi in campo per attuarle riguardano in maniera più o meno diretta gli edifici, testimoniandone ancora una volta il ruolo centrale. Sono presenti infatti misure per le diagnosi energetiche, le ESCO (*Energy Service Company*), le fatturazioni informative al consumo ed i Titoli di Efficienza Energetica (meglio noti come *certificati bianchi*). Inoltre i singoli stati sono tenuti alla predisposizione di Piani d'Azione per l'Efficienza Energetica (*PAEE*) comprendenti il settore residenziale e terziario, per i quali sono elencate una serie di misure applicabili che includono tra l'altro risparmi dovuti a

⁵ “la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio”

maggior efficienza di involucri architettonici, riscaldamento e raffrescamento, produzione acqua calda sanitaria, ventilazione e illuminazione. Tale direttiva è recepita in Italia dal D.Lgs. 115/2008, che tra l'altro modifica anche alcuni aspetti legati al sistema della certificazione energetica.

Sul piano normativo tecnico la direttiva *EPBD* ha dato origine al mandato M/343 della Commissione Europea e dell'EFTA al CEN per l'emanazione degli standard necessari. Il mandato a dato origine a più di trenta norme tecniche europee (in seguito obbligatoriamente recepite dagli organi di normazione nazionale) che regolano tra l'altro il calcolo del rendimento energetico e la validazione dei metodi di simulazione dinamica, aspetto quest'ultimo di particolare rilievo per la presente ricerca (capp. 7-8).

Nel 2010 la *EPBD* è stata *rifusa* nella nuova direttiva 2010/31/UE, che pur confermando lo spirito e l'assetto generale della precedente, pone obiettivi molto più ambiziosi e aggiorna alcuni aspetti di rilievo. È significativo che la nuova direttiva sia stata approvata mentre in Italia, a otto anni dall'entrata in vigore della precedente, il processo di recepimento non era ancora del tutto compiuto.

Più in dettaglio le innovazioni della nuova *EPBD* riguardano i seguenti punti:

- estensione dei requisiti minimi anche all'involucro ed ai sistemi tecnici (impianti, sistemi di illuminazione etc.);
- definizione dei requisiti minimi in base a *livelli ottimali in funzione dei costi*, calcolati a loro volta sulla scorta di un *quadro metodologico comparativo* comune;
- creazione di un sistema di controllo indipendente sugli attestati di certificazione energetica ed i rapporti di revisione degli impianti;
- edifici *a energia quasi zero*.

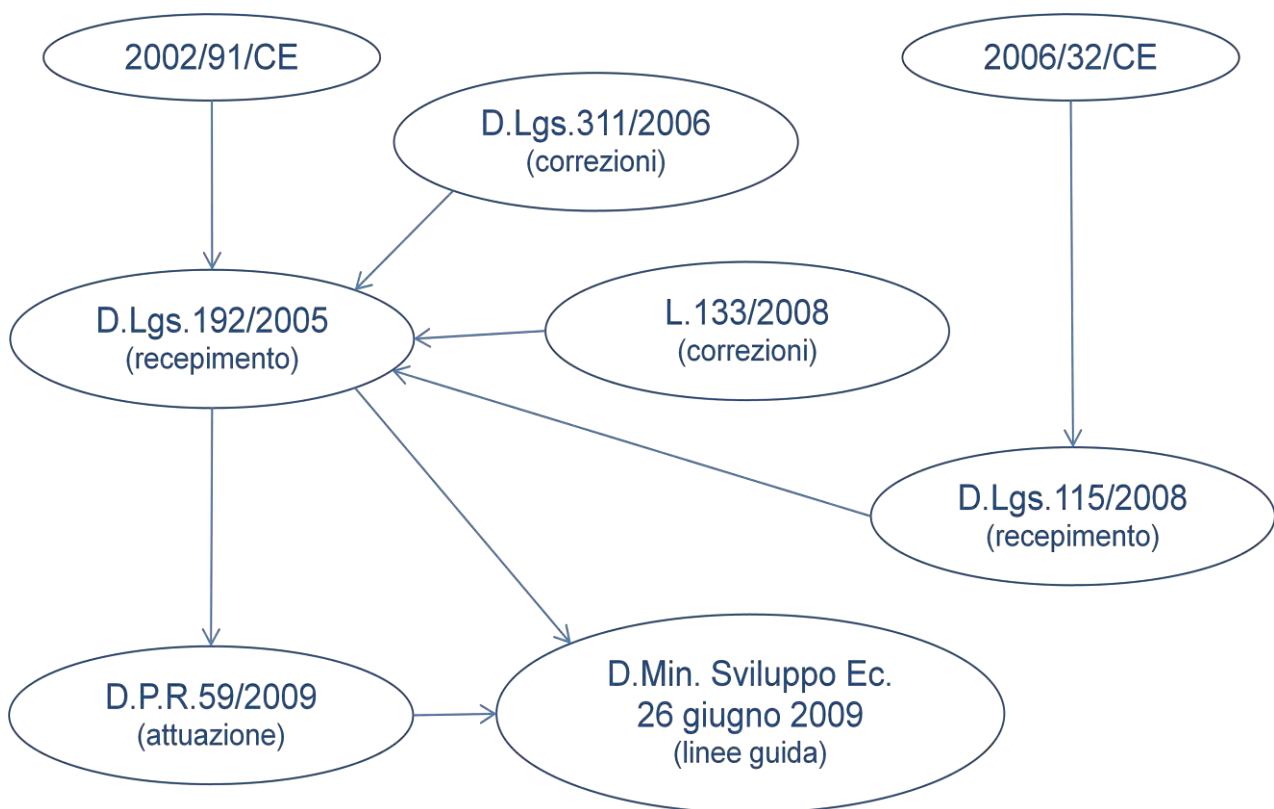
L'ultimo punto è senza dubbio il più interessante in questa sede. Si tratta, secondo la definizione della direttiva di "*edifici ad altissima prestazione energetica*" il cui fabbisogno "*molto basso o quasi nullo, dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili*". Agli stati membri è imposta l'elaborazione di piani nazionali per la loro promozione. Inoltre, entro il 2018 tutti i nuovi edifici pubblici dovranno essere di questo tipo ed entro 2020 tutti i nuovi edifici dovranno essere *a energia quasi zero*.

Una novità di tale portata promette di dare ulteriore impulso alla ricerca, alla legislazione ed al mercato dell'efficienza energetica e rende ancora più attuali e urgenti i temi della ricerca, che si occupa esattamente della riduzione dei fabbisogni energetici con strumenti progettuali e con sistemi che operano *a monte* degli impianti, limitando la domanda energetica all'origine.

Evoluzione normativa in Italia

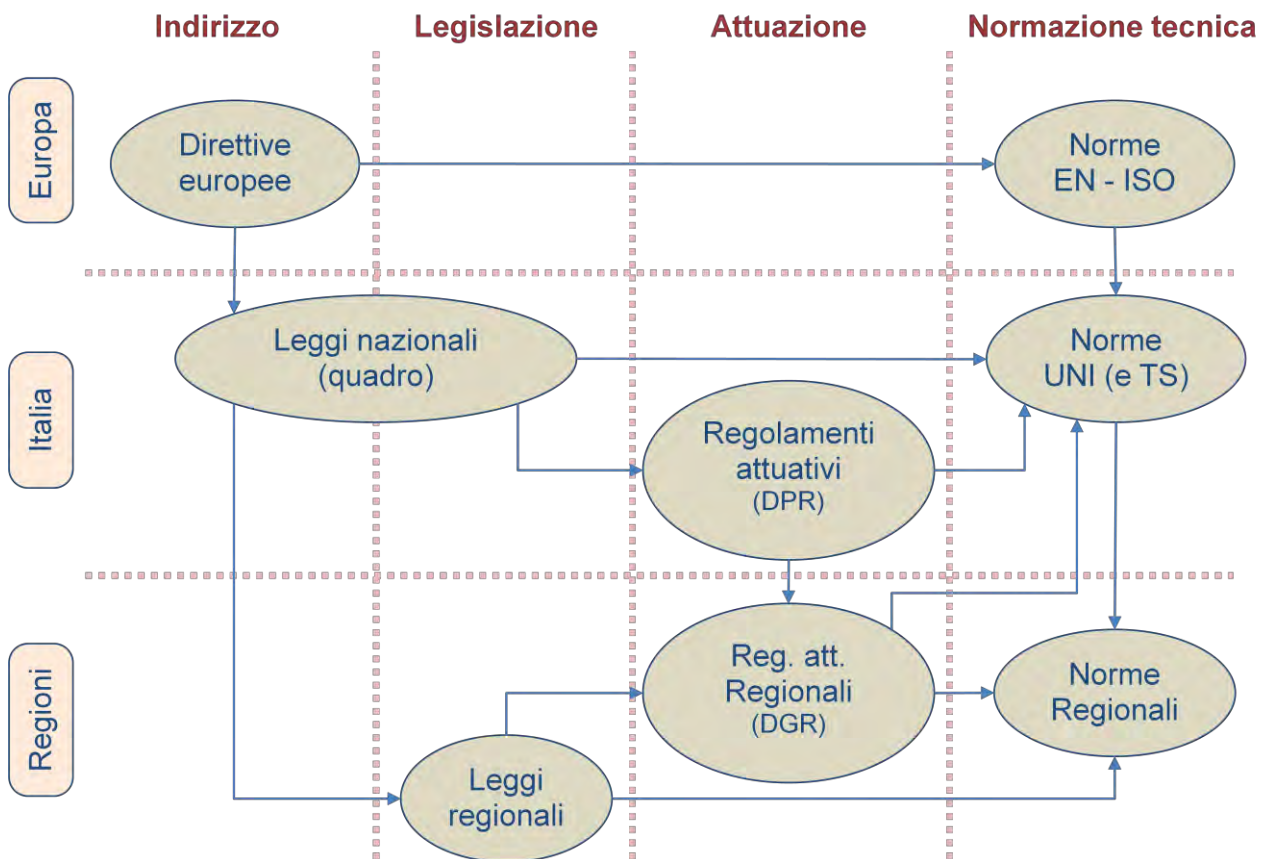
Le politiche italiane per l'efficienza energetica in edilizia partono prima della *EPBD*, e in maniera significativa dalla legge n. 10 del 1991, considerata allora all'avanguardia, e dai relativi decreti attuativi. L'impianto che ne derivava conteneva elementi innovativi che permangono nel sistema attuale, come la suddivisione del territorio in zone climatiche e l'introduzione di requisiti minimi per il fabbisogno energetico.

Successivamente l'evoluzione normativa è stata determinata, come in molti altri settori, dal quadro di riferimento europeo. Il complesso di provvedimenti legislativi di recepimento delle direttive europee di riferimento ed le reciproche relazioni sono sintetizzate nell'immagine sottostante.



Nello stesso periodo sono intervenute anche riforme costituzionali che hanno assegnato alle regioni competenze in materia di energia e dunque di certificazione energetica. Il sistema attuale (nel quale la legge 10 è modificata ma rimane in vigore) si basa quindi principalmente sui principi dettati dalle direttive europee ma si avvale di una legislazione regionale. Lo stesso assetto vale anche per la normazione tecnica, che deve essere obbligatoriamente recepita dagli standard europei e internazionali (CEN e ISO), ma a volte viene specificata fino al livello delle regioni (è il caso della Lombardia) o addirittura delle province autonome (Bolzano).

Il processo legislativo e normativo che ne deriva può essere così schematizzato.



Il quadro che ne deriva contiene elementi paradossali. Il sistema è di derivazione europea sia nei principi generali che nei procedimenti tecnici, ma si avvale anche di delibere di giunta regionali per definire procedure burocratiche tutto sommato di secondaria importanza, ma in grado di generare sistemi di accreditamento difforni e sovrapproduzione di norme. Tutto ciò compromette la chiarezza complessiva del sistema e determina una situazione fortemente frammentaria. Per un altro verso, ci sono regioni che non riescono a tenersi al passo, tanto che alcune di esse non sono mai arrivate, come già accennato a recepire la vecchia *EPBD*.

Al momento esistono dunque diverse *varianti* regionali nel sistema di certificazione energetica nazionale. Ai fini di questa ricerca l'aspetto più rilevante riguarda il piano della normazione tecnica, per il quale si farà riferimento al sistema nazionale, in vigore in tutte le regioni (la maggior parte) che non hanno prodotto specifiche anche in questo campo.

2. L'efficienza energetica e i sistemi passivi in architettura

Il capitolo contiene una trattazione tecnica sintetica dei sistemi di controllo passivo in architettura, con particolare attenzione alle potenzialità applicative in area mediterranea ed alle difficoltà di progettazione e valutazione.

2. Energy efficiency and passive systems in architecture

The chapter contains a synthetic technical treatment of passive control systems, with a focus on application potential in the Mediterranean area and on problems in design and performance assessment.

Generalità dei sistemi passivi e contribuiti all'efficienza energetica in edilizia

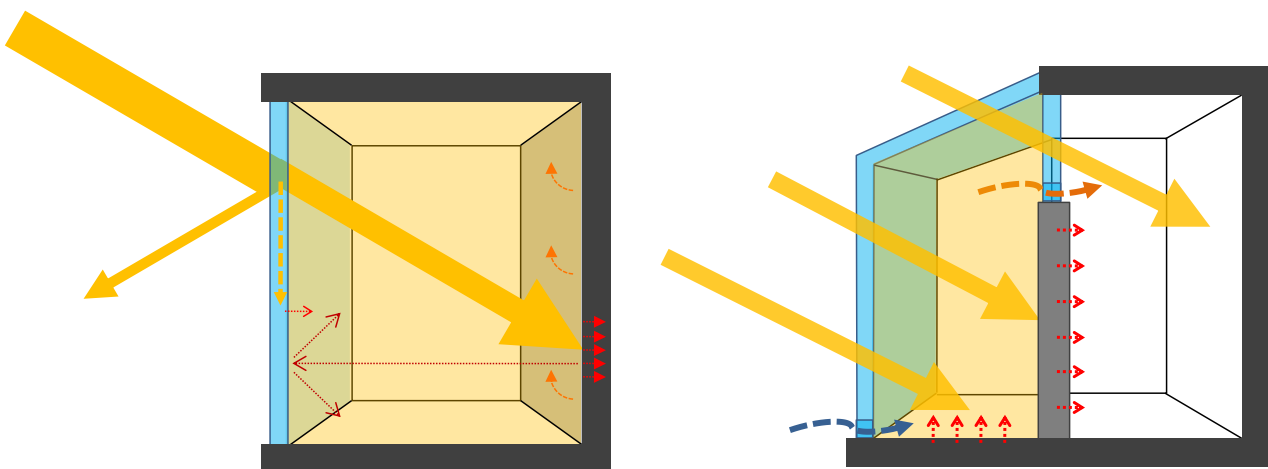
Vengono classificati come *passivi* quei sistemi controllo degli spazi confinati che mirano al raggiungimento dei requisiti di comfort interno impiegando le risorse locali climatiche e ambientali. Possono essere costituiti da sistemi tecnologici o morfologici integrati nell'edificio al fine di fornire riscaldamento e/o illuminazione e/o raffrescamento e/o ventilazione agli ambienti interni, senza far ricorso ad apparati di tipo impiantistico. Quest'ultima caratteristica non è da intendersi in maniera troppo rigida, dato che molti sistemi *sicuramente* passivi vengono ottimizzati mediante un uso moderato di dispositivi meccanici. Ne sono un esempio le serre solari utilizzate per il trattamento dell'aria di ricambio nell'ambito di sistemi di ventilazione controllata. O i condotti interrati, che possono essere aiutati da un sistema di ventilazione forzata. In entrambi i casi la componente prevalente è quella relativa all'utilizzo di risorse naturali come l'energia solare o quella accumulata nel terreno.

Nel seguito si propone una breve sintesi delle principali tipologie di sistemi passivi.

Riscaldamento passivo

L'effetto serra è sicuramente il più importante fra i fenomeni sfruttati dal riscaldamento passivo e consiste nell'innalzamento della temperatura di un ambiente chiuso esposto alla radiazione solare attraverso una superficie vetrata. Quest'ultima agisce come una valvola, permettendo al calore di entrare ed ostacolando invece l'uscita. Il vetro è infatti trasparente alle radiazioni nella banda del visibile (lunghezza d'onda 380-780 nm) e opaco alle radiazioni nella banda dell'infrarosso (lunghezza d'onda >780 nm). Quando le radiazioni che penetrano nella serra, irraggiano oggetti e strutture presenti, causano un aumento di temperatura degli stessi ed una ri-emissione del calore sotto forma di radiazioni infrarosse che non riescono più ad attraversare le vetrate. Un'ulteriore quota di calore è ceduta invece all'aria interna all'ambiente per convezione. Il risultato è appunto un accumulo di energia nelle strutture e nel volume d'aria della serra. Come è noto, il fenomeno si verifica anche a livello planetario, in questo caso è l'atmosfera terrestre a svolgere il ruolo ricoperto dal vetro nelle comuni serre.

Tutti i sistemi di riscaldamento solare si basano su questo meccanismo, che può essere impiegato direttamente nell'ambiente da riscaldare (sistemi a guadagno diretto, a sinistra nell'immagine) o prevalentemente in spazi o elementi da esso distinti (sistemi a guadagno indiretto, a destra).



schematizzazione del funzionamento diretto e indiretto dei sistemi solari passivi

Mentre il primo tipo di sistema consente un utilizzo più efficiente della radiazione solare, per via dei minori passaggi nel trasferimento dell'energia, il secondo garantisce condizioni interne più

stabili, perché agisce da *cuscinetto termico*, mediando con l'ambiente esterno. I sistemi diretti sono generalmente più adatti a climi miti, in cui l'utilizzo di ampie superfici vetrate (e dunque disperdenti oltre che captanti), non rischia di vanificare gli apporti solari nei momenti in cui l'irraggiamento solare non è presente. I sistemi a guadagno indiretto invece, grazie appunto all'effetto cuscinetto ed alla possibilità di recuperare in parte le dispersioni verso la serra (quando questa non è riscaldata dal sole) attraverso la ventilazione, produce vantaggi anche in assenza di irraggiamento.

Oltre alla captazione dell'energia per entrambi i sistemi sono richiesti un buon isolamento termico, che trattiene l'energia all'interno dell'edificio, e la capacità di accumulare una certa quantità di calore, per distribuire in benefici dei guadagni solari (limitati nel tempo) ad un periodo più lungo possibile, evitando il rischio di surriscaldamento nei momenti di intenso irraggiamento e di eccessivo abbassamento della temperatura nelle ore notturne. I dispositivi a guadagno indiretto hanno bisogno inoltre di un sistema di distribuzione del calore agli ambienti, che il più delle volte avviene attraverso una ventilazione messa in moto dai naturali fenomeni convettivi o controllata meccanicamente.

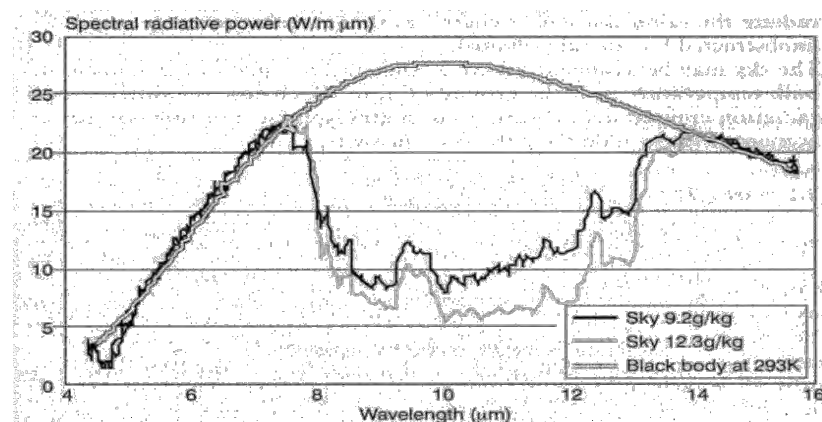
I sistemi a guadagno indiretto più comuni sono le serre solari e i muri Trombe-Michelle. Di entrambi sono presenti alcuni esempi fra i casi di studio del capitolo 5.

Nei climi che, come quello mediterraneo, comportano sia esigenze di riscaldamento che di raffrescamento nel corso dell'anno, è essenziale prevedere una configurazione dei sistemi che impedisca loro di aggravare le condizioni interne nel periodo estivo.

Raffrescamento passivo e ventilazione naturale

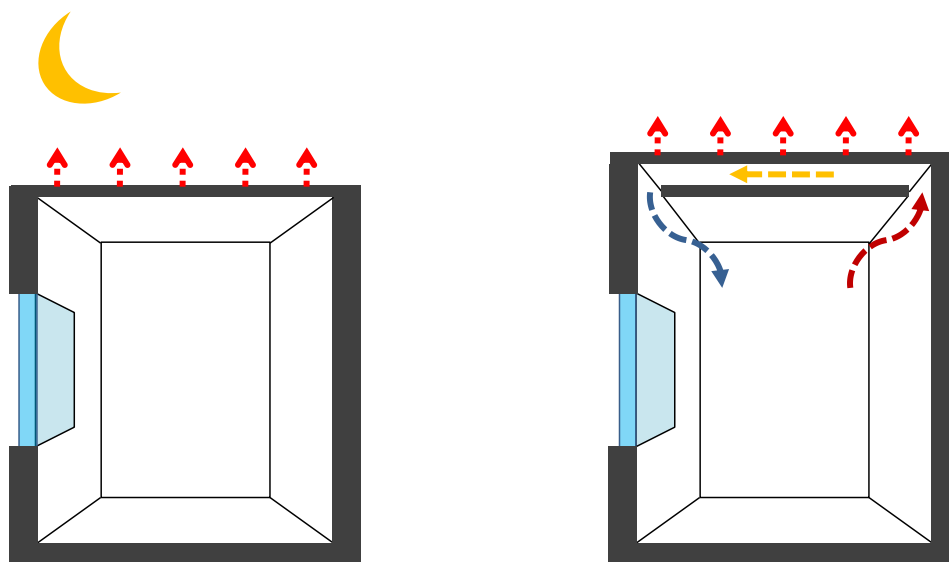
Il controllo delle condizioni estive necessita innanzi tutto di una strategia di prevenzione che limiti gli effetti dell'irraggiamento solare sull'involucro (schermature solari, intercapedini ventilate colorazioni chiare) e ne distribuisca gli effetti nel tempo (elementi massivi). La vera e propria dissipazione dell'energia può avvenire poi per mezzo di diversi sistemi che vengono generalmente classificati in base alla modalità di cessione del calore.

I sistemi radiativi diretto (a sinistra nell'immagine) o indiretti (a destra) si basano sull'irraggiamento verso la volta celeste nelle ore notturne. Sono sistemi adatti a climi non troppo umidi (nei quali l'irraggiamento verso il cielo è ostacolato dal vapore acqueo, vedi immagine) e gli edifici che li utilizzano hanno bisogno di una buona inerzia termica per accumulare i carichi termici diurni da smaltire durante la notte. Possono anche utilizzare l'acqua come fluido vettore, prendendo la forma di pannelli simili a quelli utilizzati per la produzione solare di acqua calda.



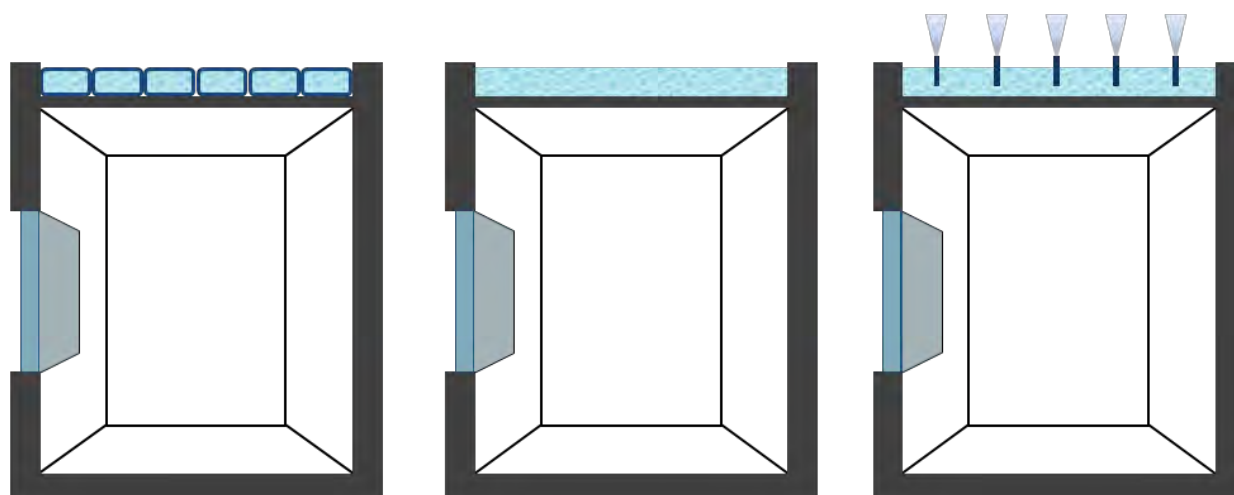
Effetti dell'umidità sulla radiazione infrarossa atmosferica ricevuta dalla superficie terrestre

(Santamouris, 2007)



schematizzazione del funzionamento diretto e indiretto dei sistemi radiativi

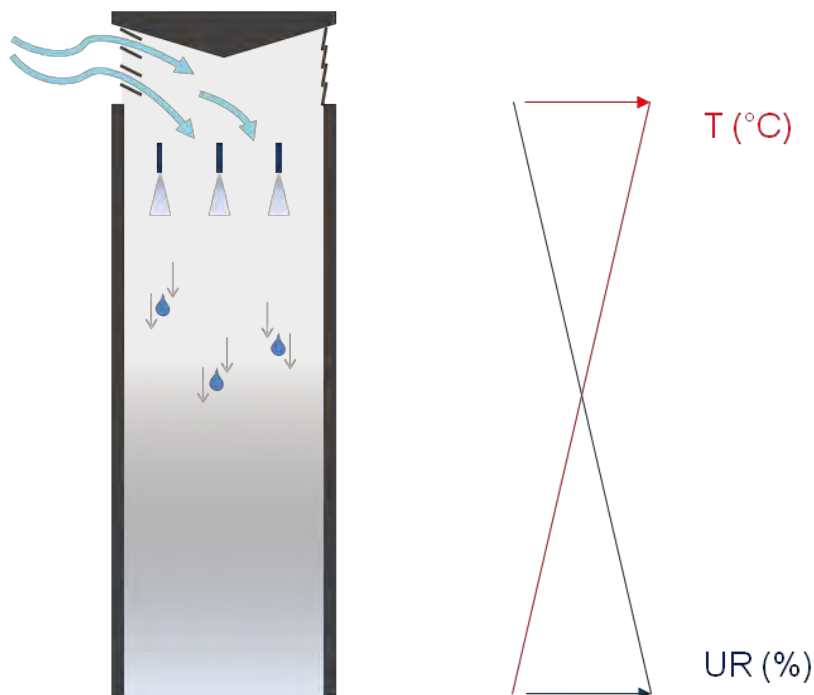
Alcuni sistemi abbinano al funzionamento radiativo quello evaporativo, ovvero la cessione di calore che viene assorbito nel cambiamento di stato dell'acqua in vapore. È il caso del *roof pond* (di cui sono schematizzate alcune varianti nell'immagine), che può avere configurazioni variabili e funzionare anche come sistema di accumulo termico in inverno. Quando un sistema utilizza entrambi i meccanismi. La presenza di un elevato tasso di umidità (che abbassa il tasso di evaporazione) è da considerare ancora più limitativo.



varianti del sistema roof pond: acqua contenuta, acqua libera, acqua libera con spruzzatori

Il raffrescamento evaporativo può essere abbinato anche a sistemi di ventilazione, come nel caso delle *torri evaporative*. In questo caso però il vapore acqueo prodotto rimane negli ambienti e l'evaporazione non determina una vera e propria dissipazione di calore ma solo una trasformazione dello stesso da sensibile in latente. Inoltre l'aumento dell'umidità relativa negli spazi serviti dal sistema deve essere tenuto sotto controllo per evitare di vanificare gli effetti positivi della

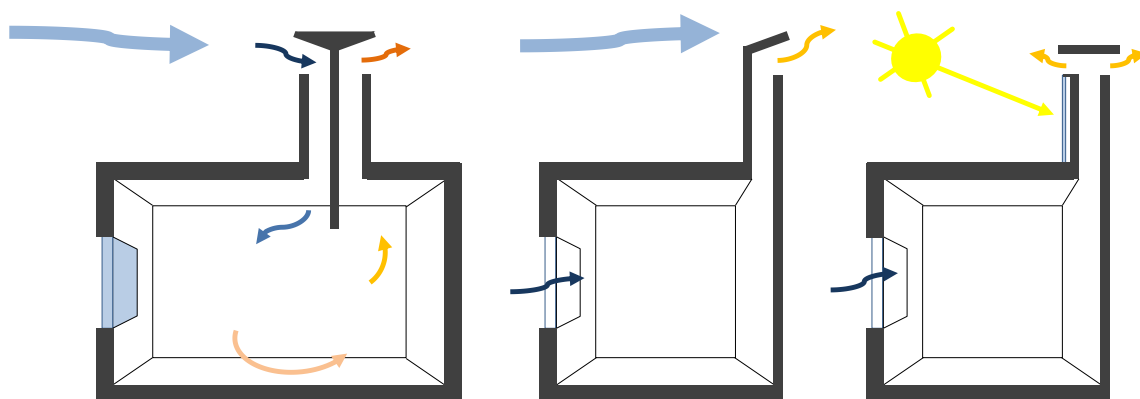
trasformazione di energia sul comfort interno. Le torri, il cui funzionamento è schematizzato in figura, possono produrre il vapore tramite spruzzatori, atomizzatori o superfici umide, e sfruttano per la movimentazione dell'aria il vento, l'effetto convettivo dovuto al raffreddamento dell'aria e il trasferimento di moto delle gocce eventualmente prodotte dagli spruzzatori.



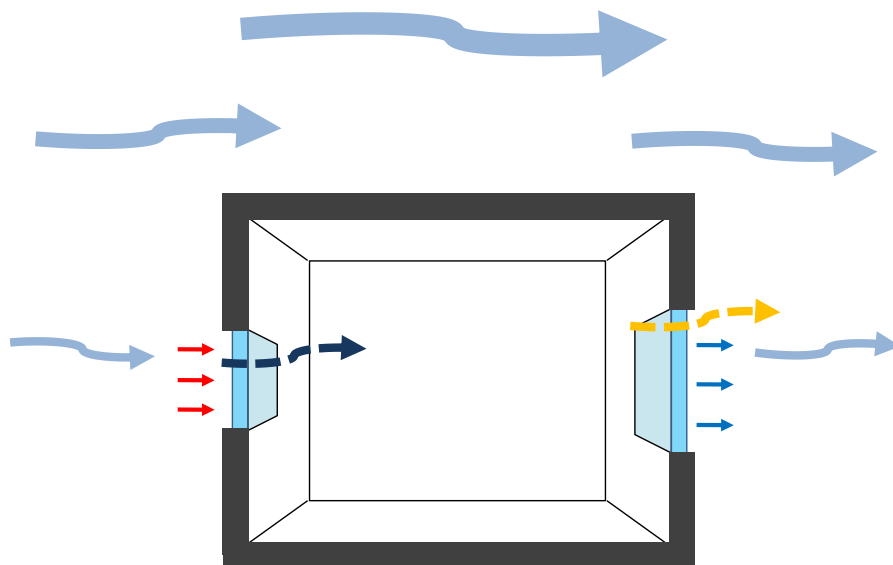
schematizzazione del funzionamento diretto di una torre evaporativa

Nel clima italiano i sistemi più funzionali e largamente applicabili sono quelli legati alla ventilazione naturale, che risponde anche alle esigenze della qualità dell'aria e può essere attivata da squilibri di pressione dovuti all'effetto dinamico del vento o alle variazioni della densità di masse d'aria a diversa temperatura (effetto camino).

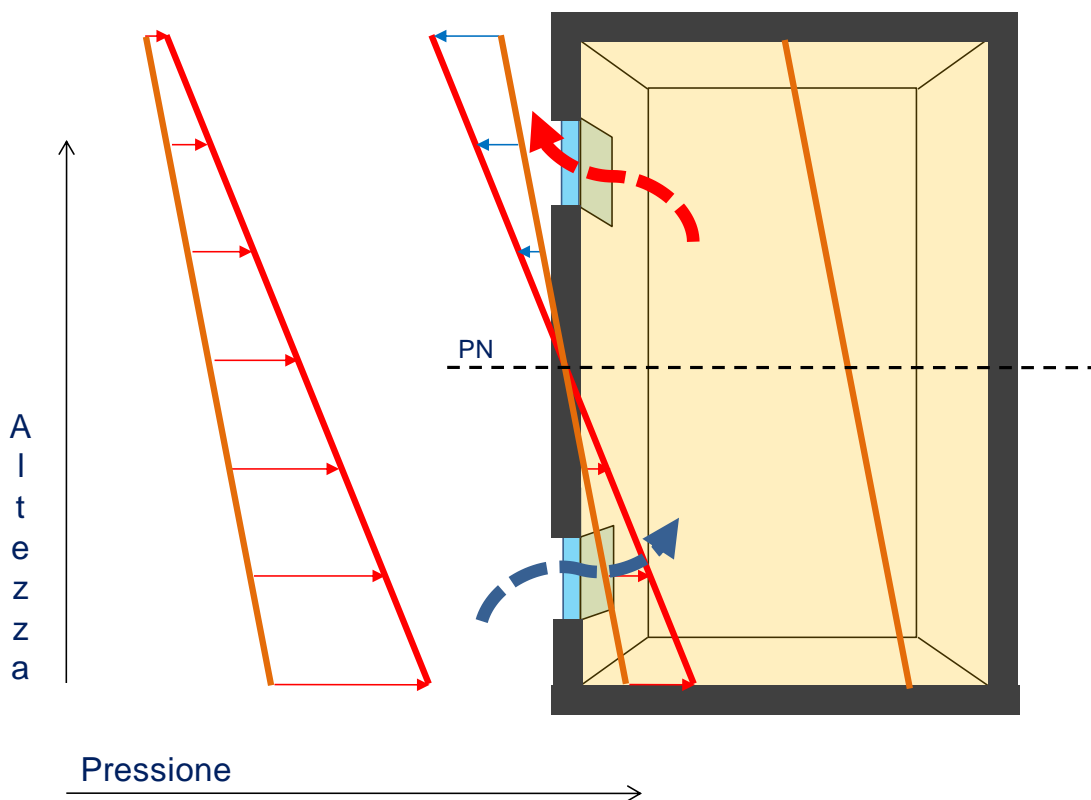
Tali meccanismi possono essere utilizzati progettando le aperture e la configurazione degli spazi in maniera opportuna o utilizzando specifici sistemi tecnologici come le torri di ventilazione, schematizzate sotto in diverse varianti.



possibili configurazioni di torri di ventilazione che sfruttano (e incrementano) l'effetto camino e/o del vento



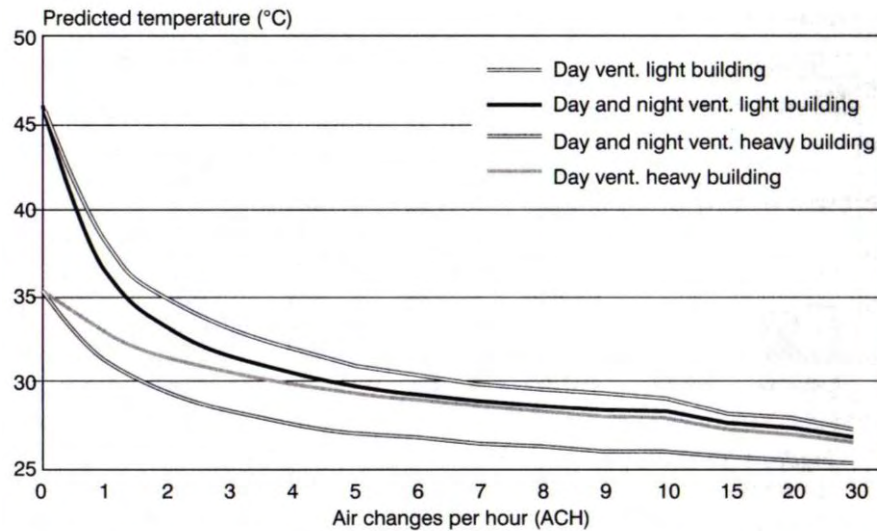
schematizzazione delle variazioni di pressioni (e conseguenti movimenti d'aria) dovute all'effetto del vento



schematizzazione delle variazioni di pressioni (e conseguenti movimenti d'aria) dovute all'effetto camino

Anche la ventilazione può essere utilizzata in regime notturno in edifici con sufficiente inerzia termica ed in climi con buone escursioni termiche giornaliere.

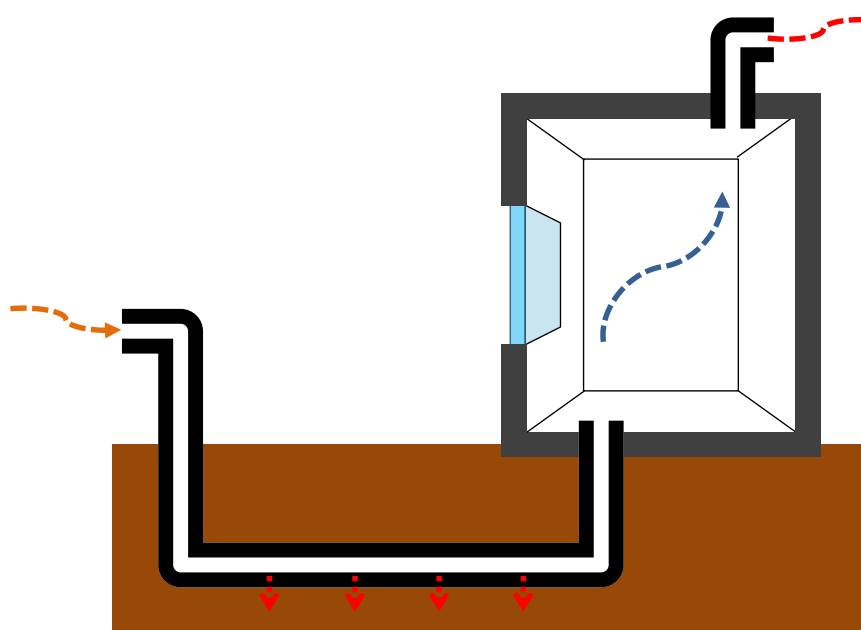
effetti della massa termica e della ventilazione notturna sugli edifici (Santamouris, 2007)



Source: Kolokotroni (2001)

Condotti interrati

Si tratta di un sistema di trattamento dell'aria esterna che sfrutta lo scambio termico con il terreno. Vengono descritti separatamente perché rivestono un particolare interesse in relazione alla presente ricerca



Schema di funzionamento dei condotti interrati

Via via che si scende in profondità, le variazioni di temperatura del terreno si stabilizzano approssimandosi alla temperatura media annuale dell'aria e divenendo poco legate alle variazioni stagionali del clima. Di conseguenza tali temperature si mantengono superiori a quelle esterne durante l'inverno ed inferiori durante l'estate. Lo scambio termico, che avviene facendo passare l'aria da immettere nell'edificio all'interno di un condotto a contatto diretto con il terreno, si rivela pertanto vantaggioso per le condizioni di comfort interne e per i consumi energetici dell'eventuale sistema di climatizzazione, che profitta di un pre-trattamento dell'aria esterna.

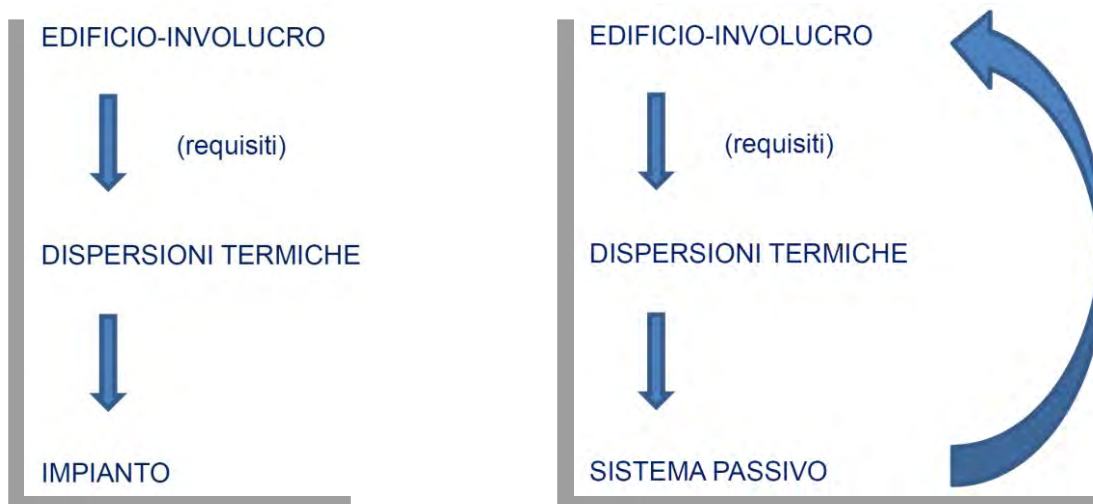
I condotti possono essere realizzati in diversi materiali (anche se per ragioni igieniche sono preferibili quelli in polietilene ad alte densità o materiali simili), devono avere un'estensione di alcune decine di metri e vengono generalmente interrati a profondità di circa 2-4 m. Il diametro è spesso compreso entro i 35-40 cm, ma sono possibili anche dimensioni maggiori.

L'efficienza di scambio dipende essenzialmente dalla lunghezza del condotto, dalla portata e velocità dell'aria al suo interno e dal tipo di terreno presente. Ovviamente sono preferibili terreni con alti valori di conduttività termica e quindi, per esempio, compatti e/o con elevato contenuto di umidità.

In alcuni casi l'abbassamento della temperatura sotto il punto di rugiada può produrre condensa all'interno dei condotti, deumidificando oltre che raffreddando l'aria, ma rendendo anche necessario lo smaltimento dell'acqua, che può essere realizzato per mezzo di una lieve pendenza e di un semplice sistema di drenaggio. La ventilazione infine può essere naturale (se le perdite di carico, la configurazione dell'edificio e l'esposizione delle bocche di ingresso dell'aria lo consentono), forzata o ibrida/assistita.

Criteri di progettazione e ruolo delle simulazioni dinamiche

La progettazione di sistemi passivi pone una serie di problemi aggiuntivi alla progettazione dell'edificio. Mentre gli impianti di climatizzazione e ventilazione meccanici possono essere dimensionati sulla base di un semplice *algoritmo* che passa per la fissazione dei requisiti ed il calcolo di dispersioni o carichi termici in base ai primi ed alle caratteristiche dell'involucro, i sistemi passivi devono essere progettati in fase iniziale secondo una modalità euristica. Infatti i sistemi sono parte dell'edificio e dell'involucro e non apparati separati, ragione per cui un dimensionamento a posteriori sarebbe impossibile e privo di senso.



In questa fase il lavoro può essere aiutato da una serie di *pattern*⁶, regole generali che guidano la scelta dei sistemi e le decisioni generali. Successivamente un dimensionamento di massima può essere stimato con l'aiuto di diagrammi o tabelle consultabili dalla letteratura tecnica, che offrono un orientamento o un *range* dimensionale all'interno del quale muoversi con un certo margine di flessibilità. Solo a questo punto possono essere utilizzati metodi *esatti*, cioè calcoli analitici o simulazioni in grado di dare un controllo più scientifico sul problema. Si tratta di sistemi di verifica più che di dimensionamento in senso stretto, che servono alla calibratura del progetto. Data la natura empirica dei passi precedenti tuttavia questo passaggio è da intendersi come parte integrante della progettazione. A questo proposito nella letteratura scientifica si parla, non solo a proposito di sistemi passivi, di *simulation based design*.

Le simulazioni dinamiche, metodo di elezione nella modellazione dei sistemi passivi (cap.4), hanno dunque un ruolo centrale non solo nella verifica e valutazione, ma anche nella progettazione degli edifici che utilizzano sistemi passivi.

⁶ Mazria, (1980)

3. Le metodologie di calcolo per la certificazione energetica

Sono analizzate le metodologie attualmente in uso per il calcolo del rendimento energetico degli edifici a livello italiano ed europeo, con una particolare considerazione per i problemi legati al calcolo dinamico ed alla valutazione dei sistemi passivi. Entrambi gli aspetti sono presenti nella normazione tecnica internazionale (UNI EN ISO 13790), ma pressoché non recepiti in quella nazionale (serie UNI TS 11300, obbligatoria ai fini della certificazione energetica).

3. The calculation methods for energy certification

Calculation methods in use at the moment for the assessment of energetic performance at European and Italian level are analyzed, particularly in regard to dynamic calculation and assessment of passive systems. Both aspects are present in the international standard (UNI EN ISO 13790), but nearly not received in the Italian legislation (UNI TS 11300 series) mandatory for energy certification purposes.

Stato dell'arte

Il rispetto dei requisiti minimi e la classificazione energetica degli edifici si basano in Europa sul calcolo del *rendimento energetico*, definito dalla direttiva 200/91/CE come

“la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio, compresi, tra gli altri, il riscaldamento, il riscaldamento dell'acqua, il raffreddamento, la ventilazione e l'illuminazione”.

Nella maggior parte dei casi si tratta di formulare una stima calcolata sulla base di dati relativi al clima, all'involucro architettonico, ai sistemi impiantistici ed alle condizioni d'uso dell'edificio. Il fatto che nella definizione si faccia riferimento ad un uso *standard* implica che l'obiettivo del calcolo non sia stimare i consumi reali dell'edificio, cosa tra l'altro pressoché impossibile, ma definirne le prestazioni in base ad un metro comune che consenta di raffrontare tra loro i diversi edifici. I reali consumi di energia sono infatti determinati da una serie di variabili legate al comportamento degli occupanti, al tipo di elettrodomestici installati e altri fattori che, oltre a non poter essere previsti con accuratezza potrebbero portare ad un risultato incoerente con l'obiettivo, perché determinato anche da elementi che hanno poco a che fare con la qualità dell'edificio in sé. Il risultato finale è comunicato attraverso un indice di prestazione che esprime il consumo specifico in kWh/mq annui per gli edifici residenziali ed in kWh/mc annui per gli altri.

I metodi di calcolo utilizzati nell'Unione Europea sono definiti a livello nazionale o regionale e possono essere differenziati in base alle caratteristiche dell'edificio e della valutazione, ma devono tutti rispettare i principi stabiliti dal quadro generale contenuto nella direttiva citata:

1. *Il metodo di calcolo del rendimento energetico degli edifici deve comprendere almeno i seguenti aspetti:*
 - a) *caratteristiche termiche dell'edificio (murature esterne e divisioni interne, ecc.). Tali caratteristiche possono anche includere l'ermeticità;*
 - b) *impianto di riscaldamento e di produzione di acqua calda, comprese le relative caratteristiche di coibentazione;*
 - c) *sistema di condizionamento d'aria;*
 - d) *ventilazione;*
 - e) *impianto di illuminazione incorporato (principalmente per il settore non residenziale);*
 - f) *posizione ed orientamento degli edifici, compreso il clima esterno;*
 - g) **sistemi solari passivi e protezione solare;**
 - h) **ventilazione naturale;**
 - i) *qualità climatica interna, incluso il clima degli ambienti interni progettato*

2. *Il calcolo deve tener conto, se del caso, dei vantaggi insiti nelle seguenti opzioni:*
 - a) *sistemi solari attivi ed altri impianti di generazione di calore ed elettricità a partire da fonti energetiche rinnovabili;*
 - b) *sistemi di cogenerazione dell'elettricità;*
 - c) *sistemi di riscaldamento e condizionamento a distanza (complesso di edifici/condomini);*
 - d) **illuminazione naturale.**

3. *Ai fini del calcolo è necessario classificare adeguatamente gli edifici secondo categorie quali:*

- a) *abitazioni monofamiliari di diverso tipo;*
- b) *condomini (di appartamenti);*
- c) *uffici;*
- d) *strutture scolastiche;*
- e) *ospedali;*
- f) *alberghi e ristoranti;*
- g) *impianti sportivi;*
- h) *esercizi commerciali per la vendita all'ingrosso o al dettaglio;*
- i) *altri tipi di fabbricati impieganti energia.*

Di recente l'intera direttiva, dalla quale deriva il quadro legislativo nazionale attualmente in vigore, è stata sostituita dalla nuova 31/2010/UE, che ha confermato l'assetto generale del metodo, precisando alcuni punti. In particolare il punto a) della prima parte, *caratteristiche termiche*, contiene un sottoelenco in cui compaiono anche *capacità termica* e *riscaldamento passivo*, lasciando intravedere una ancora maggior attenzione ai sistemi di controllo naturale ed agli aspetti dinamici del problema.

Sul piano normativo tecnico alla direttiva è seguita, per questo aspetto in particolare, la pubblicazione di uno standard internazionale per il calcolo del fabbisogno, che in Italia è stato recepito (in inglese) come UNI EN ISO 13790:2008 (Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento).

All'interno della norma sono presenti tre metodi di calcolo:

- 1. Metodo *quasi stazionario (monthly quasi-steady-state calculation method)*
- 2. Metodo *dinamico semplificato (simple hourly dynamic calculation method)*
- 3. Metodo *dinamico dettagliato (detailed dynamic calculation method)*

Il primo funziona su base mensile, gli altri due su base oraria. I primi due sono descritti nei dettagli e forniti con le serie complete delle equazioni necessarie (*fully prescribed*), il terzo è descritto solo mediante le procedure principali, con prescrizioni che riguardano i dati d'ingresso, le condizioni al contorno e le modalità di validazione degli strumenti.

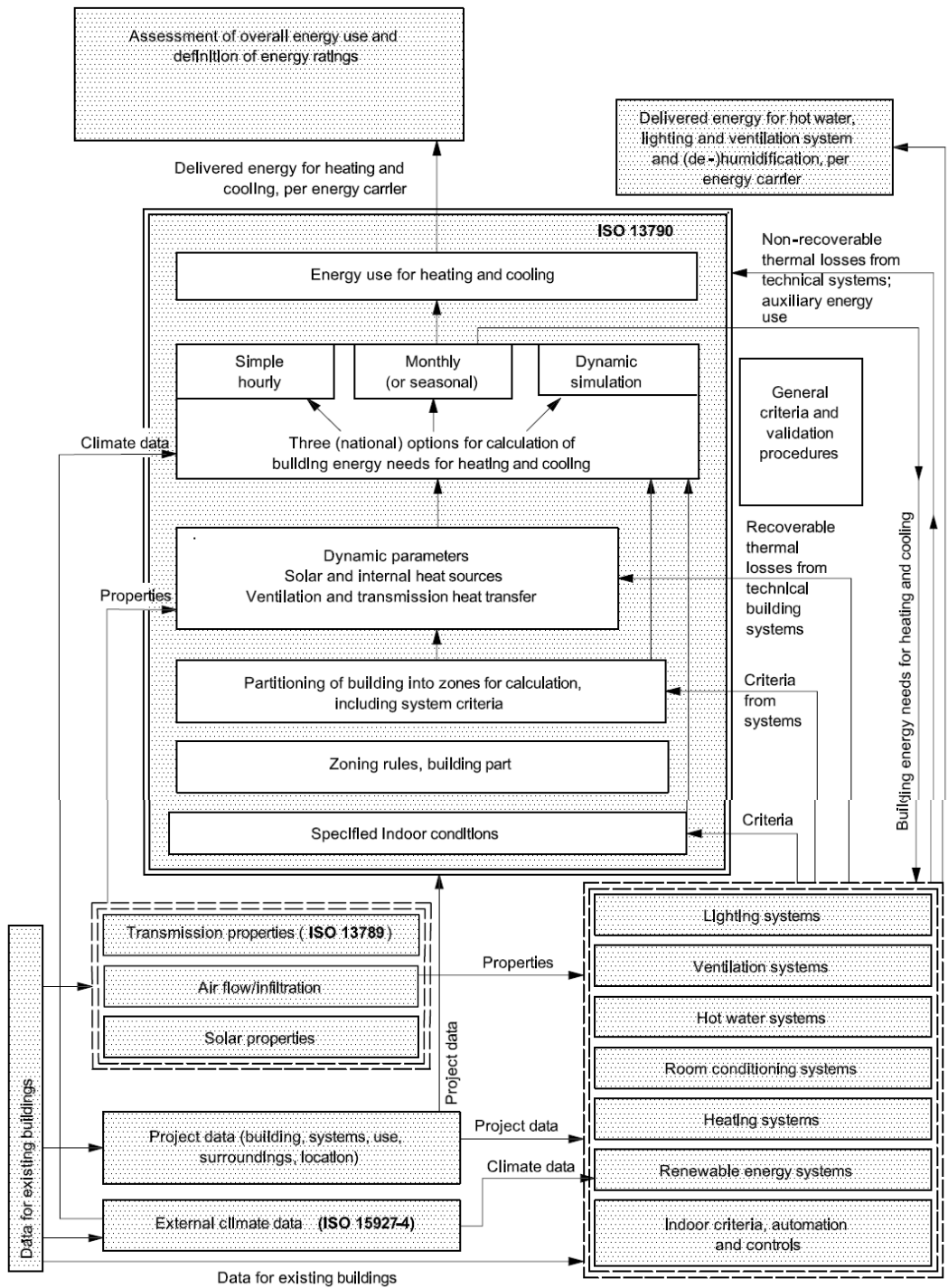
La principale differenza fra i metodi dinamici e quello stazionario è, oltre alla diversa periodizzazione (mensile nel primo caso, oraria o sub-oraria nel secondo) consiste nel modo in cui vengono modellati i fenomeni di accumulo e cessione del calore nelle strutture.

A parità di bilancio totale, la diversa inerzia termica e/o la diversa tempistica dei flussi di energia possono comportare esiti differenti nei fabbisogni energetici e nelle condizioni degli spazi interni.

Ad esempio l'azione della radiazione solare o di un carico interno in un momento in cui non sia presente una domanda di riscaldamento, causa un aumento della temperatura oltre la soglia necessaria a garantire il comfort degli occupanti, con la conseguenza di una maggiore dispersione termica verso l'esterno ma non di un risparmio energetico. Tale inconveniente è ridotto se le strutture a contatto con gli ambienti hanno un'elevata capacità termica. Quest'ultima condizione in compenso provoca un aumento dei fabbisogni con funzionamento intermittente degli impianti.

Nei metodi dinamici invece viene calcolata l'effettiva quantità di energia accumulata e ceduta dai diversi materiali presenti nell'edificio per ogni *time-step*, operazione impossibile per i metodi che utilizzano una base di calcolo mensile e che si avvalgono di *fattori di riduzione* per tenere in considerazione i fenomeni descritti.

Gli aspetti considerati nel calcolo e le reciproche relazioni, a prescindere dal metodo utilizzato sono schematizzate nella norma dal seguente diagramma.



La scelta finale del metodo deve essere operata a livello nazionale in base a diverse (e a volte contrastanti) esigenze, fra cui le principali sono:

- accuratezza (il grado di precisione e reattività alle modifiche nel modello)
- robustezza (la capacità di operare in condizioni diverse senza significative perdite di accuratezza)
- trasparenza (il grado di comprensibilità del metodo per chi lo utilizza o ne valuta i risultati)
- riproducibilità (la possibilità di verificare e ripetere la valutazione)

Attualmente in Italia la principale metodologia ufficiale per il calcolo dei fabbisogni energetici ai fini della certificazione energetica è quella definita dalle norme della serie UNI TS 11300. Va notato che si tratta di *specifiche tecniche*, cioè di norme che rappresentano uno stato dell'arte non del tutto consolidato e/o sulle quali non è stato ancora raggiunto un livello di consenso unanime. Per questa ragione le loro durate è limitata nel tempo a tre anni e le prime norme pubblicate dovrebbero subire a breve una revisione.

La serie, intitolata *Fabbisogni energetici degli edifici* si compone di quattro parti

UNI TS 11300-1:2008 *Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*

UNI TS 11300-2:2008 *Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria*

UNI TS 11300-3:2010 *Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva*

UNI TS 11300-4 (in fase di elaborazione) *Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria*

La parte prima, che riguarda i fabbisogni termici degli ambienti, è quella di maggiore interesse ai fini della presente ricerca, perché si occupa delle prestazioni dell'edificio *a monte* dell'intervento degli impianti e dunque nell'ambito di azione dei sistemi passivi. Fra i tre metodi della norma internazionale è stato recepito quello *quasi stazionario*. Tutti i calcoli sono quindi organizzati per mese (o frazione di mese all'inizio e alla fine delle stagioni di climatizzazione) e i risultati vengono aggregati alla fine.

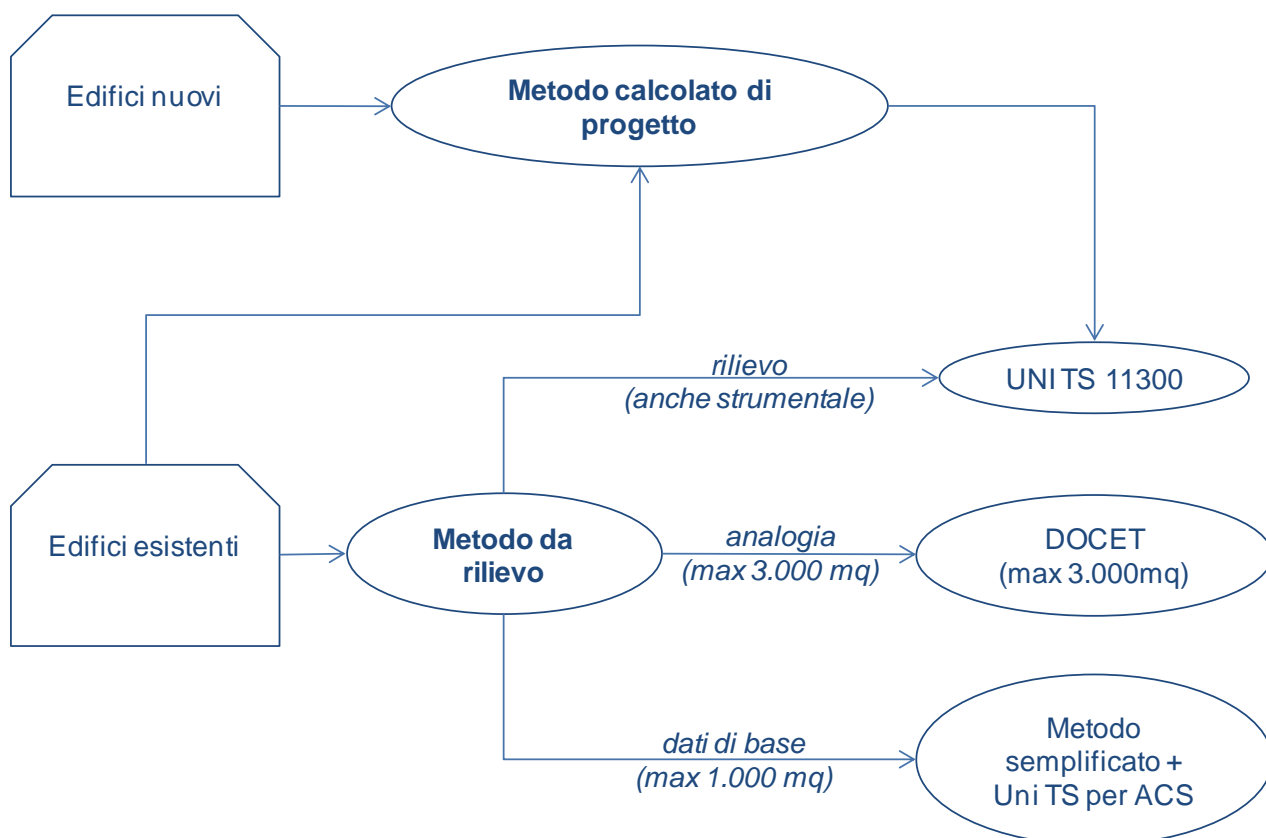
Nell'applicazione della procedura vengono previsti tre diversi tipi di valutazione, le prime due, *standard* e *di progetto*, sono da utilizzare per le verifiche di conformità normativa su edifici, esistenti o in progetto, e si distinguono essenzialmente per la provenienza dei dati di input (rilievo la prima da progetto la seconda). Il terzo, più flessibile, è definito *adatto all'utenza* e può essere utilizzato per analisi di vario tipo, come diagnosi e ottimizzazioni.

L'intera procedura delle norme UNI TS 11300 può essere implementate in software informatici che devono ottenere un attestato di conformità dal Comitato Termotecnico Nazionale per assumere valore ai fini della certificazione energetica.

Accanto a questo metodo principale, che nelle *Linee guida per la certificazione energetica*⁷ viene definito *calcolato* ed è declinato nelle due varianti *di progetto* e *da rilievo*, è possibile utilizzare altri due di più semplice e veloce applicazione (e minore accuratezza), nella valutazione di edifici esistenti si superficie utile fino a 3.000 mq.

Il primo metodo alternativo, Docet, sviluppato come software da CNR ed ENEA, fonda la valutazione sull'analogia con edifici esistenti di cui si conoscono le prestazioni. È di semplice utilizzo e richiede pochi input facilmente reperibili: località, anno di costruzione estensione e tipologia dei diversi componenti di involucro, caratteristiche dei generatori etc. È in grado di tener conto anche di sistemi di produzione energetica da fonti rinnovabili (solare termico e fotovoltaico).

Il secondo metodo alternativo è quello definito nell'allegato 2 delle stesse *linee guida* e serve a determinare il solo fabbisogno per la climatizzazione invernale (per l'acqua calda sanitaria si fa ricorso alla UNI TS 11300-2) per edifici esistenti di massimo 1.000 mq di superficie utile. Si basa su dei calcoli semplificati che tengono conto dei gradi giorno della località, delle caratteristiche dell'involucro esterno, dell'esposizione delle superfici vetrate e dei rendimenti dell'impianto (che vengono ricavati dalle tabelle della UNI TS 11300-2). Fra i 3 metodi è quello più semplice ed approssimativo.



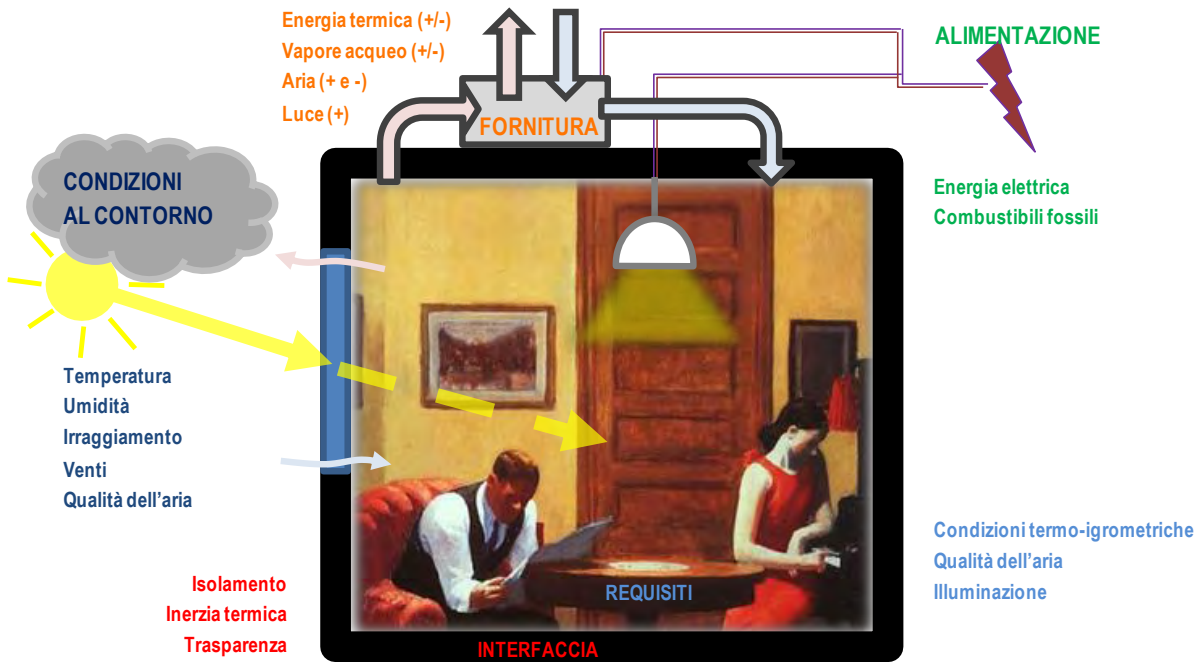
⁷ Decreto del Ministero per lo Sviluppo Economico 26 giugno 2009

Nel complesso, il quadro di prescrizioni specifiche, requisiti minimi prestazionali e classi energetiche è funzione del tipo di edificio e di requisiti ambientali al suo interno e dalla zona climatica in cui è situato.

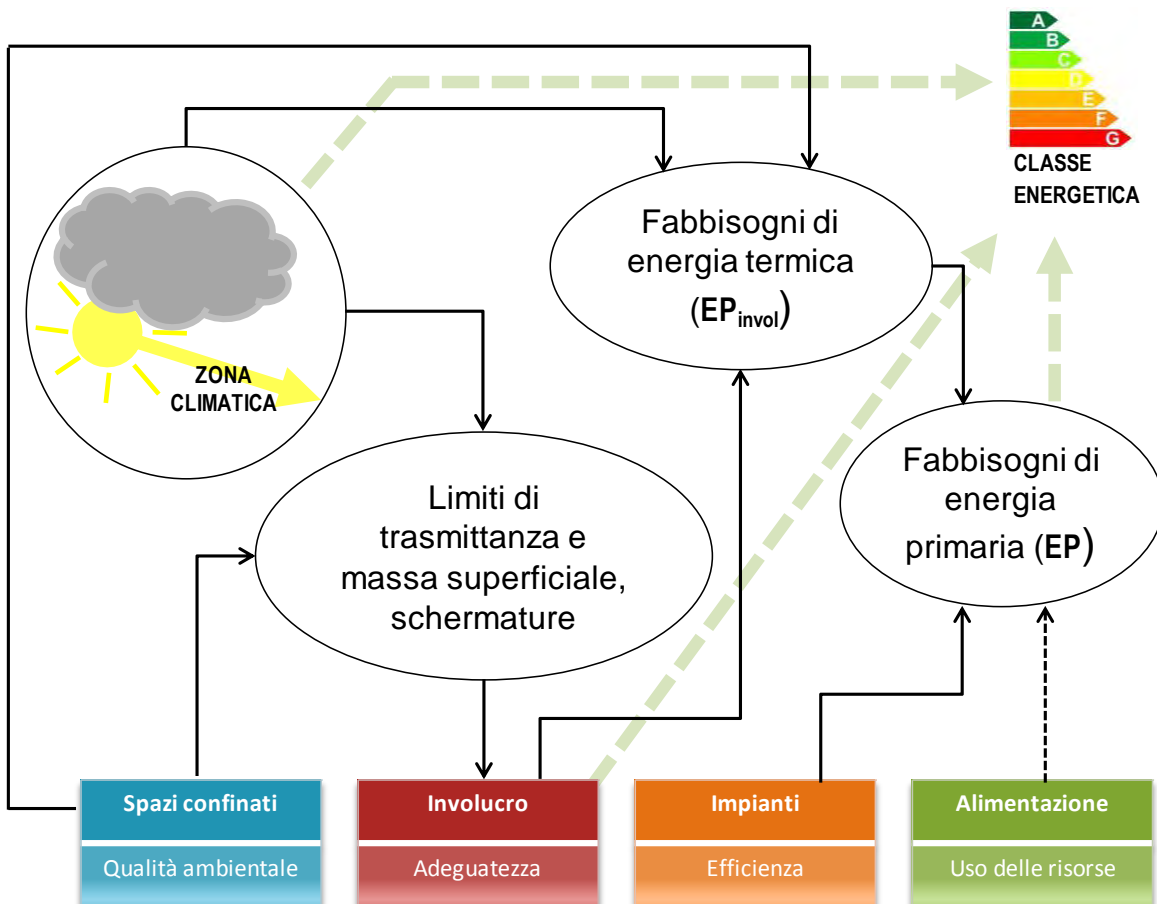
Nel calcolo, la configurazione dell'involucro architettonico, che agisce da interfaccia fra gli spazi confinati nelle condizioni imposte dai rispettivi requisiti ambientali ed il clima esterno determina poi il fabbisogno di energia termica degli ambienti, ovvero l'energia da aggiungere o sottrarre al fine di mantenerli nella temperatura desiderata. L'efficienza degli impianti (il rapporto fra tale energia fornita agli ambienti e quella assorbita) determina infine i consumi energetici o *energia fornita* all'edificio. Dato che per rendere omogenei i termini di confronto l'energia valutata è quella primaria, l'ultimo passaggio consiste proprio in questa conversione, che dipende dal tipo di energia utilizzata.

A partire dal fabbisogno di energia primaria, viene assegnata una classe energetica che dipende dal rapporto fra l'indice di prestazione (EP) calcolato e l'indice di prestazione limite, determinato in base al rapporto di forma (superficie disperdente / volume riscaldato) ed ai gradi giorno del comune in cui l'edificio si trova.

In prospettiva l'indice di prestazione dovrà comprendere i consumi per riscaldamento, acqua calda sanitaria, raffrescamento, e illuminazione, anche se al momento vengono realmente valutate solo le prime due voci dell'elenco.



sistemi coinvolti nella determinazione degli obblighi e dei requisiti normativi e nella determinazione della prestazione energetica dell'edificio



Limiti delle metodologie in uso

L'insieme dei tre metodi descritti fornisce un insieme opportunamente diversificato in funzione dello scopo della valutazione e dei dati disponibili. È corretto infatti l'utilizzo di metodi anche molto semplificati quando le conoscenze sull'oggetto da modellare sono approssimative e il reperimento dei dati di input per un modello più complesso sarebbe difficoltoso e soggetto a margini d'errore così ampi da vanificare la (presunta) maggiore accuratezza del procedimento. Non sussistono dunque difficoltà o ostacoli nelle valutazioni più ordinarie.

Tuttavia i metodi rivelano alcuni limiti se devono essere applicati alla valutazione di oggetti più complessi e/o innovativi o che utilizzano sistemi passivi.

Infatti nessuno dei tre metodi opera in regime dinamico e le procedure specifiche per la valutazione dei sistemi passivi contenute nello standard internazionale non sono state recepite nella serie delle norme nazionali.

La UNI EN ISO 13790 contiene infatti un allegato dedicato al calcolo dei contributi passivi di elementi particolari:

Annex E: Heat transfer and solar heat gains of special elements

Nell'allegato sono descritti dei metodi di calcolo dedicati a alcuni fra i più comuni sistemi passivi: serre solari addossate, muri trombe, elementi di involucro ventilati e con isolamento trasparente. Le norme italiane indicano come metodo di calcolo le quattro specifiche tecniche italiane e non la norma internazionale, per cui non è pacifico stabilire se tali metodi di calcolo possano essere applicati alla certificazione energetica. Comunque l'elenco è (ovviamente) limitato ad alcuni sistemi più comuni e non consente un'agevole valutazione di elementi che abbiano configurazioni o applicazioni diverse da quelle usuali, come capita ad esempio in alcuni dei casi di studio illustrati nel capitolo 5.

Per quanto riguarda il calcolo dinamico, la UNI TS 11300-1 lascia aperta questa possibilità per la valutazione dei fabbisogni termici, ponendo come condizione la validazione del metodo utilizzato per mezzo dello standard europeo UNI EN 15265.

Contribuire al superamento dei limiti appena descritti è uno dei principali obiettivi di questa tesi, che propone due contributi basati sull'utilizzo delle simulazioni dinamiche.

PARTE II: IMPOSTAZIONE DEL PROBLEMA

Le simulazioni dinamiche, individuate come possibile soluzione dei problemi posti nella parte precedente, vengono trattate nei loro caratteri generali ed in rapporto alla valutazione dei sistemi passivi, formulando delle ipotesi di ricerca.

PART II: PROBLEM SETTING

Dynamic simulations, identified as a possible solution for problems stated in the previous part, are treated in their general features and in relation with passive systems assessment. A research hypothesis is advanced.

4. La simulazione dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici

Si descrivono il funzionamento, le applicazioni e le problematiche legate alle simulazioni dinamiche, includendo una selezione critica dei principali strumenti disponibili ad oggi. Le caratteristiche di tale metodologia, in grado di modellare in maniera realistica le interazioni delle diverse parti dell'organismo edilizio, la variabilità delle grandezze in gioco, e le specificità climatiche, di assetto locale e di utilizzo dell'edificio, la rendono adatta a supportare la progettazione e la valutazione dei sistemi passivi.

4. The dynamic simulation of energy performance of buildings

Operation, applications and problems related to dynamic simulation are described, including a critic sorting of the main tools available at the moment. The features of such methodology, able to model in a realistic way the interactions between different parts of buildings, the variability of involved quantities and the peculiarities of climate and site, make it suitable to support design and assessment of passive systems.

Introduzione

Una progettazione architettonica consapevole dal punto di vista energetico e delle prestazioni ambientali può essere fondata, oggi più che in passato, sulla conoscenza di dati affidabili. Affrontando tali questioni emergono molto chiaramente la complessità del problema e l'ampiezza del margine di incertezza insito nell'operare esclusivamente sulla base di modelli progettuali tradizionali. Infatti, mentre la maggior parte dei manufatti diversi da quelli edilizi possono essere testati sul campo prima della loro produzione, attraverso la realizzazione di prototipi e la conduzione di esperimenti sull'oggetto reale, ciò è praticamente impossibile nel caso degli edifici, proprio perché non si tratta di prodotti seriali. La verifica conclusiva può avvenire dunque solo dopo la realizzazione, quando è ormai troppo tardi per apportare correzioni, se non di scarso rilievo e con alti costi. La possibilità di ovviare a tale inconveniente è offerta oggi dalle simulazioni informatiche, in grado di predire con un buon grado di approssimazione il comportamento futuro di un qualsiasi edificio. In particolare le simulazioni dinamiche rappresentano il livello più evoluto nel settore e possono fornire indicazioni dettagliate e affidabili su tutti gli aspetti tecnicamente rilevanti della progettazione. È questa certamente una delle strade attraverso le quali può passare l'innovazione dell'architettura e dell'edilizia, sfruttando le possibilità offerte dalle nuove tecnologie in fase progettuale e lasciando potenzialmente inalterata la semplicità (ed i costi) del manufatto finale, che può esprimere il proprio livello tecnologico anche nella semplice conformazione degli spazi e dell'involucro architettonico.

La tecnica delle simulazioni è largamente diffusa in relazione ad altri aspetti dell'architettura, come quelli estetici. Rendering e animazioni infatti sono ormai in grado di mostrare l'aspetto di un edificio in progetto in maniera sorprendentemente realistica e con uno sforzo relativamente ridotto, alla portata anche del singolo professionista. Per ciò che riguarda invece le prestazioni energetiche e tutti gli aspetti non visibili del progetto, ci troviamo ancora in una fase nella quale la diffusione è molto limitata per una serie di ragioni che includono sia problemi intrinseci alle metodologie, sia, in Italia ma non solo, cause esterne come il mancato adeguamento delle normative, della didattica e della ricerca, nonché la carenza delle professionalità necessarie.

Si cercherà qui di rendere conto in maniera sintetica dello stato dell'arte in materia, con uno sguardo particolare agli aspetti peculiari dei sistemi passivi.

I tipi di simulazione disponibili per gli edifici sono molti e coprono aspetti diversi, quali l'analisi del ciclo di vita, l'illuminazione, l'acustica, la ventilazione, i consumi energetici, il comfort termigrometrico. Gli strumenti possono essere molto specifici, ma numerosi tra loro considerano diversi problemi insieme tra quelli citati. In questa sede l'attenzione verrà focalizzata perlopiù sulle prestazioni energetiche e sulla qualità ambientale interna in termini termigrometrici. La corretta valutazione di questi implica comunque l'inclusione di tutti gli elementi che concorrono al comportamento del sistema edificio-impianti nel suo complesso. Per esempio, quando anche non si voglia studiare il comfort visivo, sarà necessario includere nel modello una rappresentazione degli impianti di illuminazione, che hanno ricadute termiche ed energetiche molto rilevanti. Normalmente invece non entrano in questo tipo di simulazione le analisi delle prestazioni acustiche e del ciclo di vita. In quest'ultimo caso è piuttosto la stima dei consumi energetici a dover essere considerata come parte del problema più ampio.

Oltre agli scopi per i quali vengono eseguite, le simulazioni si differenziano anche in base alla metodologia di calcolo. La distinzione che si ritiene più importante evidenziare è quella tra metodi statici e dinamici. Nel primo caso il calcolo viene eseguito sulla base di caratteristiche indipendenti dal tempo e considerate stabili, per esempio i gradi giorno della località, le trasmittanze dell'involucro, i rendimenti medi degli impianti. Tali sistemi non sono in grado di replicare il comportamento reale dell'edificio, ma forniscono dei parametri utili, ad esempio, a valutare più edifici sulla base di criteri comuni, univoci e di semplice applicazione. Non a caso la maggior parte

dei protocolli necessari alle verifiche di conformità normativa che riguardano le prestazioni energetiche utilizzano procedure di questo tipo.

Nelle simulazioni dinamiche, al contrario, quasi tutti i valori sono considerati variabili dipendenti dal tempo e i risultati riescono a riprodurre la realtà con un ottimo grado di approssimazione. La rappresentazione dinamica risulta dalla ripetizione dei calcoli in una successione ravvicinata, in maniera analoga all'effetto di movimento conseguente alla proiezione di una rapida sequenza di fotogrammi. Ad ogni passaggio le variabili vengono aggiornate in funzione delle condizioni climatiche esterne (come irraggiamento solare, velocità e direzioni dei venti, temperature esterne), delle impostazioni dell'utente (come accensione degli impianti e presenza di occupanti), dei risultati del calcolo precedente (come temperature interne, dispersioni e carichi termici). Per ottenere un grado di approssimazione accettabile le ripetizioni di solito sono distanziate di non più di 60 minuti (del periodo simulato), ma per risultati più precisi vengono effettuati 4-6 calcoli per ogni ora, o anche molti di più per determinati algoritmi di calcolo. Ciò significa che una tipica simulazione che copra il periodo di un anno, necessario a valutare in modo completo tutti gli aspetti dell'edificio, avrà bisogno di circa 35.000 calcoli.

La complessità ed i tempi necessari ai due tipi di approccio non sono dunque comparabili, ma lo stesso vale per i risultati. Per darne un'idea basterà citare un recente studio italiano⁸ che ha testato su una piccola casa una metodologia semplificata, messa a punto dal Politecnico di Milano in base alle indicazioni del D.Lgs 192/05, ed una dinamica, basata sul motore di simulazione EnergyPlus, sviluppato dal Lawrence Berkeley National Laboratory di San Francisco. Le due metodologie sono implementate rispettivamente nei software Bestclass e DesignBuilder, che sono stati utilizzati per le simulazioni. Il confronto dei risultati con i consumi invernali reali, verificati sulla base delle bollette energetiche, ha mostrato un'approssimazione di ben il 27,9% per la simulazione semplificata e di solo lo 0,7% per quella dinamica. Ciò non significa ovviamente che la procedura del Politecnico non funzioni; semplicemente, le due metodologie sono pensate per avere potenzialità e applicazioni diverse. Bestclass infatti è utilizzato per la certificazione energetica nella provincia di Milano, scopo al quale adempie correttamente, mentre EnergyPlus è diffuso in tutto il mondo come strumento di ricerca e sperimentazione, nonché di verifica e ottimizzazione di soluzioni progettuali avanzate. Le applicazioni, come si vedrà non sono limitate solo a questi aspetti e non escludono neanche le verifiche di conformità alle norme, nonostante queste presentino ancora dei problemi.

La nascita delle simulazioni dinamiche può essere fatta risalire ai primi anni '60 del secolo scorso, quando negli Stati Uniti iniziarono le prime limitate sperimentazioni, rimaste a lungo legate alla storia del paese. Era un'epoca nella quale lo scoppio di una guerra nucleare sembrava un'eventualità concreta e la ricerca architettonica e ingegneristica rivolgeva parte degli sforzi verso una tipologia oggi fortunatamente meno usuale: il rifugio antiatomico. Si tratta evidentemente di un tipo di edificio molto particolare, completamente interrato, molto affollato e di dimensioni ridotte, al quale si chiedeva comunque di garantire protezione e condizioni ambientali accettabili per un periodo quanto più lungo possibile. Una tale sfida progettuale ha stimolato la ricerca di nuove metodologie, fra le quali, appunto, le simulazioni informatiche dinamiche. Se per un verso, infatti, le condizioni ambientali sono particolarmente difficili, dal punto di vista della modellazione un bunker rende possibili, rispetto ad un edificio normale, alcune significative semplificazioni che ne fanno un caso di partenza ideale: non è necessario calcolare i carichi termici solari e gli effetti del vento, le condizioni esterne sono simili su tutti i lati e facili da rappresentare, i flussi d'aria sono controllati meccanicamente. Fra i primi a dedicarsi a questa impresa fu, a Washington, un ricercatore proveniente proprio dal Giappone⁹, l'unico paese ad aver davvero subito un bombardamento nucleare. Il suo programma riusciva già a predire l'andamento orario di temperature, umidità e condensazione e veniva validato tramite misurazioni su un rifugio reale, abitato da una famiglia di quattro componenti, impersonati da cilindri metallici riscaldati e ricoperti

⁸ Tronchini e Fabbri, 2008

⁹ Si tratta di Tamami Kusuda, che è anche una delle fonti principali di questa breve ricostruzione (Kusuda, 2001)

da panni umidi, i SIMOC, che riproducevano gli effetti dei corpi umani sull'ambiente interno. Per ottenere i risultati relativi a 14 giornate erano necessarie circa 10 ore di calcolo di un potente computer del tempo.

Alla fine del decennio un passo importante fu la creazione di un *task group* dell'ASHRAE¹⁰ sui requisiti energetici, il suo compito era quello di studiare il calcolo dei carichi termici, la modellazione di sistemi ed impianti e lo sviluppo di dati climatici standard, il tutto finalizzato proprio allo sviluppo delle simulazioni informatiche. A questo punto la ricerca era ben avviata, ma per avere l'impulso decisivo bisognerà aspettare una nuova crisi, questa volta quella energetica del 1972, che negli Stati Uniti sarà l'occasione per un forte incremento nei finanziamenti governativi al settore e per la conseguente migrazione di numerosi e validi ricercatori provenienti da campi affini. Nello stesso periodo le nuove ricerche sul calcolo dei carichi solari e dell'ombreggiamento, insieme al lavoro di Fanger sulla valutazione del comfort termico, completarono la gamma di strumenti che rendono possibile l'applicazione delle simulazioni anche agli edifici normali, in superficie.

In questo contesto si tennero quattro importanti simposi internazionali in USA (Gaithersburg 1971), Francia (Parigi 1974), Canada (Banf 1978), e Giappone (Tokyo 1983), che favorirono la nascita di un'ampia comunità scientifica mondiale impegnata nella materia e che posero le basi per la nascita dell'IBPSA¹¹, l'organizzazione internazionale di riferimento per tale comunità.

Contemporaneamente vennero sviluppati i primi programmi destinati a scopi più ampi, anche se per avere a disposizione dei modelli di simulazione simili a quelli odierni si dovrà aspettare la metà degli anni '80, quando la nascita del Personal Computer rese accessibile la potenza di calcolo necessaria. A partire da questo momento, le uniche variabili indipendenti rimangono in sostanza le dimensioni di spazio e di tempo, tutto il resto può mutare dinamicamente in funzione di altre grandezze.

Il passo successivo più importante è avvenuto con le prime applicazioni di CFD (*Computational Fluid Dynamics*) allo studio degli edifici nei primi anni '90. Da allora questo è diventato uno dei campi di ricerca più vivaci nel settore, anche se sul terreno dell'integrazione con la termodinamica resta ancora molto da fare.

una breve sintesi sull'origine e l'evoluzione di alcuni fra i principali software in circolazione

i primi programmi di simulazione su larga scala sono NBSLD (National Bureau of Standards Load Determination program, 1974) poi evoluto in BLAST, e CAL-ERDA, sviluppato dall' Energy Research and Development Administration nel 1977 per il Post Office, poi evoluto in Doe2 (e successivamente in eQuest). Dalla confluenza di queste esperienze è nato infine EnergyPlus, uno dei software più completi e precisi disponibili al momento

ESP-r inizia la sua storia nel 1974 dalla tesi di dottorato di Joe Clark nell'università di Strathclyde in Scozia, dove continua ad essere sviluppato ancora oggi.

TRNSYS nasce nei primi anni '70 per supportare gli studi sulle tecnologie solari condotti in una casa sperimentale costruita in Colorado. Viene commercializzato per la prima volta nel 1975.

Ecotect vede la luce nel 1996, è forse il primo software del genere pensato da architetti per l'uso di altri architetti ed è uno degli strumenti più utili nel conceptual design.

¹⁰ American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers

¹¹ International Performance Building Simulation Association

Attualmente, con i modelli di calcolo in gran parte definiti e ad un buon livello di approssimazione, i fronti di ricerca si sono in parte rivolti verso la creazione dei presupposti indispensabili all'effettivo sfruttamento delle potenzialità di questa disciplina ed alla sua stabile integrazione all'interno dell'iter progettuale in architettura. I temi principali sono lo sviluppo di interfacce grafiche che consentano un utilizzo più semplice e veloce e l'interoperabilità fra gli strumenti di simulazione e gli altri coinvolti nel processo progettuale, sempre più complesso e multidisciplinare. Altro tema essenziale è quello della *quality assurance*, la garanzia di qualità, assolutamente indispensabile sia in ragione del ruolo delle simulazioni, volte ad supportare la formazione di decisioni durante l'iter progettuale, che della loro natura, che esclude, nella maggior parte dei casi, un riscontro immediato.

Funzionamento

La simulazione è un processo che mira a prevedere la successione degli eventi, a partire da una situazione iniziale definita e da un sistema di regole. Nel nostro caso si tratta di eventi fisici che riguardano i flussi di energia e materia all'interno dell'edificio e tra questo e l'ambiente esterno. La situazione iniziale è definita attraverso la descrizione delle caratteristiche termo-fisiche e delle variabili temporali del sistema (edificio-impianti, occupanti e ambiente), e il sistema di regole è costituito dal modello fisico che si utilizza (il motore di calcolo del software).

Un modello è una rappresentazione della realtà operata attraverso la selezione e l'astrazione delle conoscenze su un determinato oggetto o sistema. Il modello matematico fornisce la rappresentazione delle leggi fisiche imposte, mentre le informazioni inserite dall'utente sono la rappresentazione - il modello appunto - dell'edificio, degli impianti, degli occupanti e dell'ambiente.

La prima operazione che l'analista deve effettuare è la scelta del sistema di regole (quindi del software) che meglio si adatta agli scopi della simulazione ed alle informazioni disponibili. Quanto più il sistema è preciso, tanto più sarà complesso, lungo da programmare, difficile da gestire ed esposto ad errori da parte dell'utente. La scelta di un sistema adeguato è quindi essenziale non solo per una buona riuscita dello studio, ma anche per una gestione razionale delle risorse. Sarà infatti inutilmente lungo e faticoso, e quindi costoso, l'utilizzo di un modello troppo sofisticato per gli scopi che si perseguono.

La medesima regola è valida nella costruzione del modello, cioè nella selezione delle informazioni (input) che si chiede al computer di elaborare. Se per esempio nelle fasi iniziali di un progetto si vogliono ottenere informazioni in merito all'estensione ottimale della superficie vetrata su una data esposizione, potrebbe non essere necessario dettagliare la geometria di ogni singolo infisso, i profili di comportamento degli utenti, le caratteristiche degli impianti e così via, ma basteranno informazioni molto più semplici sulla forma dell'edificio, sul tipo di vetro e sull'estensione totale delle superfici finestrate. Il risultato non sarà forse preciso al millesimo, ma del resto sarebbe inutile che lo fosse su un edificio ancora tutto da progettare.

Ciò che è davvero importante è che la selezione sia corretta e consapevole e che l'approssimazione nei dati sia appropriata. La cosa non è del tutto scontata neanche per un analista esperto e in alcuni casi, specie quelli di particolare complessità o quelli progettati per esperimenti seriali, il modello può necessitare di alcune verifiche ed aggiustamenti preliminari che prendono il nome di *calibratura*.

Esaurite queste prime fasi la simulazione può essere avviata e produrre dalle informazioni di partenza (*input*) altre informazioni (*output*). Questi ultimi dati spesso necessitano di un'ulteriore elaborazione da parte dell'utente, che li aggrega ed analizza in funzione delle proprie esigenze. Nei casi standard questa operazione, come altre fra quelle descritte, può essere in parte svolta automaticamente dal programma.

CLIMA

*temperature dell'aria
contenuto di vapore acqueo
pressione atmosferica
velocità e direzione vento
radiazione diretta e diffusa
temperatura radiante cielo
temperatura del terreno*

AREA

*coordinate geografiche
rugosità del terreno
albedo superfici circostanti
elementi ombreggianti*

ZONE TERMICHE

*volume
ricambi d'aria
involucro
masse interne
carichi interni
occupanti*

INVOLUCRO

*proprietà fisiche dei materiali
proprietà ottiche dei vetri
schermature solari
eventuali sistemi avanzati*

CARICHI INTERNI

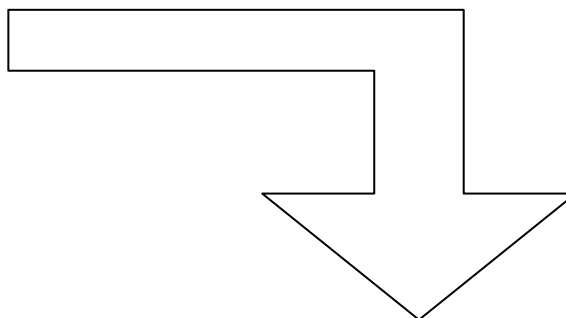
*illuminazione artificiale
cucine
computer ed elettrodomestici
altre fonti di calore e vapore*

OCCUPANTI

*numero
attività metabolica
abbigliamento*

IMPIANTI

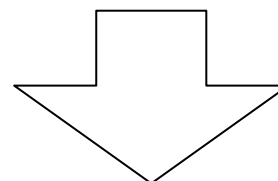
*orari di funzionamento
impostazioni dei termostati
alimentazione
efficienze
sistemi di distribuzione*



principali dati di input

SIMULAZIONE

principali risultati ottenibili



EDIFICIO

*carichi e dispersioni termiche
fabbisogni termici
temperature interne
umidità interna
ventilazione naturale
qualità dell'aria
illuminazione naturale
illuminazione artificiale
comportamento passivo*

IMPIANTI

*potenze di picco
distribuzione dei carichi
consumi energetici
efficienza
emissioni di gas serra*

OCCUPANTI

indici di comfort

Va comunque tenuto in conto che l'intero processo di modellazione e simulazione è pervaso da elementi di incertezza che rendono problematica l'interpretazione dei risultati. Tale incertezza è dovuta a più fattori, primo fra tutti la reale conoscenza del sistema da simulare. Che si tratti di un edificio esistente o di un progetto, le informazioni in nostro possesso sono tutt'altro che sicure. Anche il più rigoroso dei simulatori non sarà in grado, per esempio, di conoscere le reali caratteristiche fisiche dei materiali utilizzati e dovrà accontentarsi dei dati di riferimento presenti nelle norme o nelle schede tecniche. I valori reali sono sempre leggermente diversi e dipendono dalle materie prime utilizzate e da come lo specifico elemento è stato prodotto, lavorato e messo in opera. Il risultato di tali differenze viene ritenuto trascurabile in ragione del fatto che, utilizzando valori medi, esse probabilmente si compenseranno l'una con l'altra. Ma si tratta appunto di una probabilità, un evento che può verificarsi con più facilità rispetto ad altri, ma sul quale non si hanno certezze. Allo stesso modo non si può prevedere il comportamento esatto degli occupanti di un edificio. Gli orari di presenza, il numero esatto di persone, il modo di utilizzare le cucine e l'illuminazione artificiale, l'apertura delle finestre, l'utilizzo di tende e schermature in genere sono solo alcune delle variabili che influiscono sulle prestazioni dell'edificio ma che non possono essere rappresentate con un grado di precisione molto elevato. Ciò vale ugualmente per le condizioni climatiche e per gli impianti ed è particolarmente rilevante negli edifici residenziali (le maggior parte dunque), che non hanno una gestione organizzata di orari, personale e climatizzazione come può avvenire per altre tipologie funzionali. Alle incertezze relative ai dati inseriti, vanno poi aggiunte le approssimazioni (anche geometriche) del modello, che è per definizione un'astrazione ed una semplificazione della realtà.

L'effetto congiunto di tutti questi elementi fa sì che l'incertezza del risultato finale sia maggiore a quella relativa ai singoli aspetti, che possono essere valutati attraverso un'analisi di sensibilità, ovvero uno studio dell'importanza dei singoli parametri sul risultato finale. L'approssimazione potrà quindi essere ridotta, ma mai eliminata completamente e per questo i risultati vanno interpretati in senso probabilistico più che deterministico (questa non è una novità nel campo della progettazione, dato che persino il calcolo strutturale si avvale di approcci probabilistici). Naturalmente un'elevata probabilità equivale ad una ragionevole certezza, ma non sempre è possibile conseguirla. Nel caso in cui le simulazioni debbano informare decisioni progettuali sarà dunque essenziale una corretta stima e rappresentazione dell'incertezza, e spetterà poi al progettista assumersi la responsabilità di scegliere quale rischi correre. Per esempio avere un edificio che non soddisfi pienamente i requisiti di comfort in alcune limitate situazioni (pochi giorni dell'anno particolarmente caldi), o investire una cifra superiore a quella necessaria (installando un impianto di condizionamento).¹²

Entrando più nello specifico, è essenziale sapere quali sono le informazioni necessarie per applicare concretamente una metodologia di questo tipo (diagramma). Naturalmente non tutti gli aspetti di seguito descritti sono inclusi in tutti i modelli.

¹² Si veda De Witt S., Uncertainty in building simulation (in Malkawi e Augenbroe, 2004)

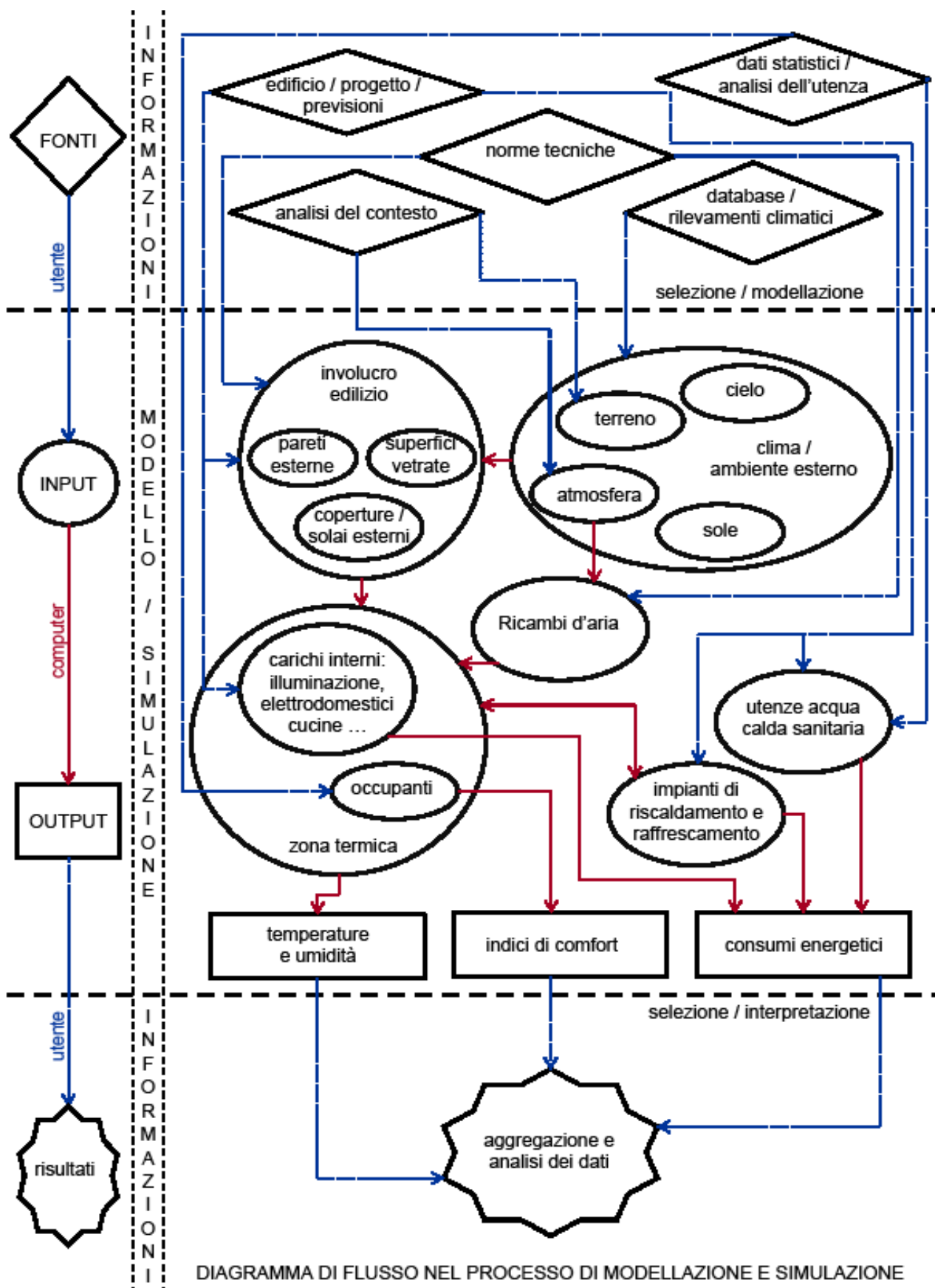


DIAGRAMMA DI FLUSSO NEL PROCESSO DI MODELLAZIONE E SIMULAZIONE

Il primo sottosistema che viene descritto, in ordine cronologico, è di solito quello relativo all'ambiente esterno e al clima. Normalmente i modelli sono già in gran parte predisposti sottoforma di file climatici, che raccolgono l'andamento orario o sub-orario dei parametri principali lungo un anno di riferimento. Quest'ultimo è costruito in base ai dati registrati negli ultimi decenni. Si tratta comunque di un'operazione problematica, dato che le variabili in gioco sono molte e non risultano ancora chiare (quando ci sono) le relazioni tra esse. Nel corso degli anni sono stati sperimentati diversi approcci, che si fondano sulla elaborazione di serie medie o sulla selezione e assemblaggio di serie reali e rappresentative di condizioni tipiche. L'utente finale nella maggior parte dei casi si limita comunque a individuare il file della località più vicina al sito in esame e, a volte, a specificare alcune informazioni aggiuntive che riguardano l'altitudine, la natura del terreno e il contesto (urbano, suburbano, campestre, etc.) nel quale si trova l'edificio. Questi elementi servono ad avvicinare il modello alla situazione reale, dato che quasi mai le stazioni meteorologiche si trovano nelle immediate vicinanze dell'edificio e che anche le variazioni microclimatiche possono avere un certo rilievo, per esempio per ciò che riguarda l'azione dei venti. Qualora non fossero disponibili i dati necessari, è possibile ricostruirli in modo realistico a partire dalle semplici medie climatiche pubblicate da tutte le stazioni meteorologiche.¹³

i principali formati informatici internazionali di organizzazione dei dati climatici per le simulazioni

EPW (EnergyPlus Weather) è il formato internazionale elaborato espressamente per le simulazioni dinamiche, contiene i dati più completi, dettagliati e precisi per questo scopo ed è probabilmente destinato a diventare uno standard nel settore

TRY (Test Reference Year) è il formato per l'Europa, Russia e Turchia incluse, predisposto dalla CEC (Commission of the European Community)

EWY (Example Weather Year) è il formato per il Regno Unito della CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers)

WYEC2 (Weather year for energy calculations) è il formato per gli Stati Uniti predisposto dall'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

CWEC (Canadian Weather for Energy Calculations) è il formato dell'AES per il Canada

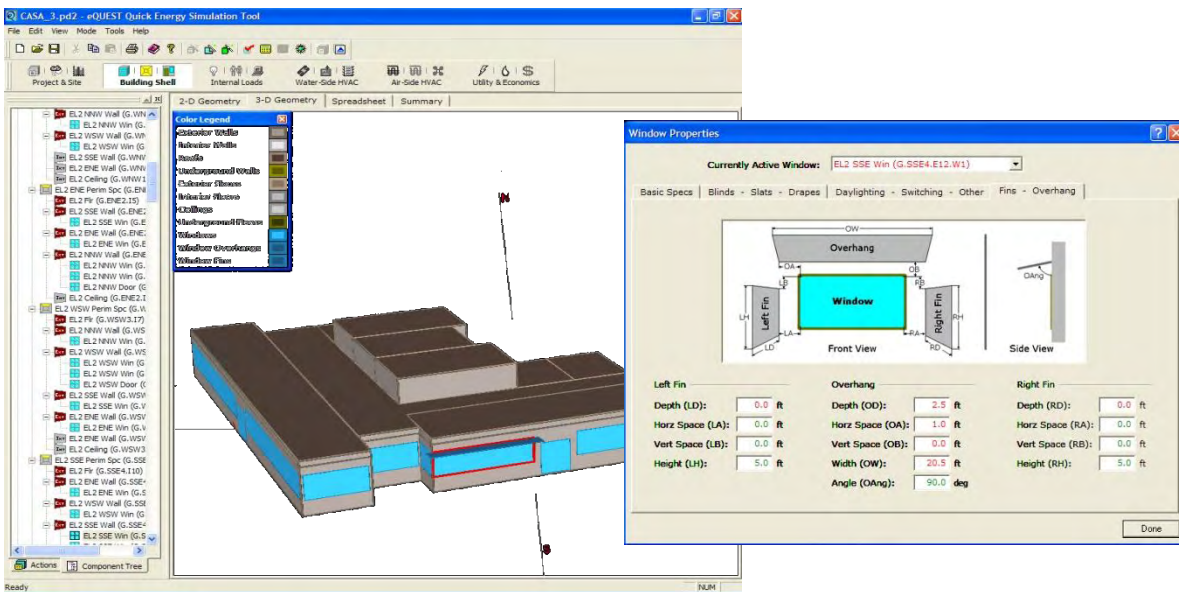
SWY (Standard Weather Year) è il formato studiato per il Giappone della SHASE (Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers)

Conclusa la parte relativa al contesto ambientale inizia l'operazione più laboriosa, ovvero la modellazione del sistema edificio-impianti. L'edificio viene scomposto in zone termiche, che non corrispondono necessariamente ai singoli ambienti. Queste sono trattate come entità fisiche che concentrano le proprietà e le relazioni appartenenti alle porzioni omogenee di edificio che rappresentano. L'omogeneità riguarda essenzialmente il tipo di utilizzo, di carichi interni, di climatizzazione e ventilazione. Le zone sono l'elemento centrale del modello e scambiano energia e materia (aria e vapore acqueo) tra di loro, con l'ambiente esterno, con gli impianti, con gli occupanti. Sono inoltre soggette ai carichi termici dovuti a illuminazione artificiale, elettrodomestici e cucine. Gli impianti possono essere definiti in maniera più o meno dettagliata a seconda dei fini della simulazione e in alcuni casi possono essere rappresentati solo attraverso gli scambi finali di energia con le zone. Tutte le variabili che si modificano nel tempo a seconda delle impostazioni dell'utente sono caratterizzate attraverso le *schedule*, delle tabelle che contengono i

¹³ Si veda Degelman L., Simulation and uncertainty (in Malkawi e Augenbroe, 2004)

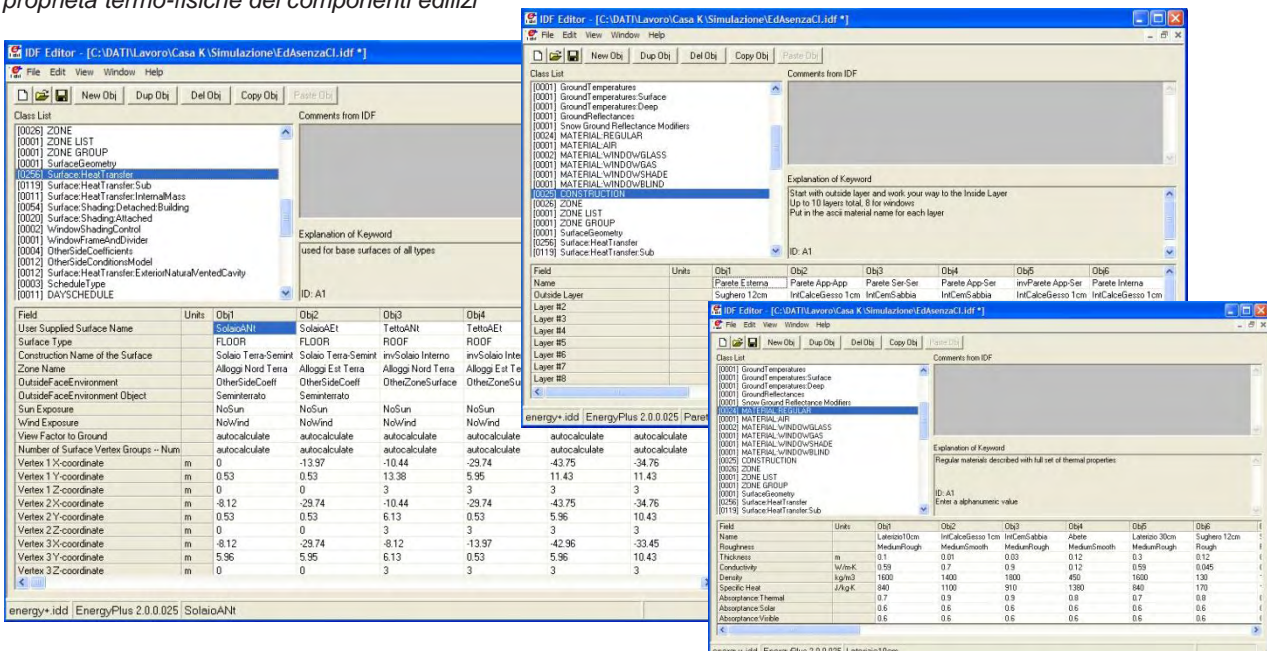
profili temporali con le variazioni per ogni ora o frazione di ora. Normalmente vengono organizzate in settimane tipo che si ripetono nel corso dell'anno. Con la compilazione di tali profili il modello può considerarsi completo.

La maniera di inserire i dati nel modello è diversa in ogni software. Quelli commerciali o comunque di più largo utilizzo sono generalmente dotati di interfacce utente che semplificano le operazioni e, in alcuni casi, di veri e propri *wizard*, procedimenti guidati che accompagnano l'utente passo dopo passo. All'estremo opposto ci sono programmi come EnergyPlus, che mancano quasi completamente di interfaccia grafica e richiedono l'inserimento della maggior parte dei dati direttamente in forma numerica (persino le superfici vengono descritte tramite le coordinate geometriche). Alla maggiore semplicità corrisponde solitamente una maggiore approssimazione sia del modello che dei risultati.



modellazione di un edificio in eQuest attraverso un'interfaccia grafica

modellazione di un edificio in EnergyPlus attraverso l'inserimento di input numerici che descrivono la geometria e le proprietà termo-fisiche dei componenti edilizi



In una ricerca sulla simulazione degli edifici residenziali¹⁴ sono stati individuati i parametri più significativi attraverso un'analisi di sensibilità. Lo studio era condotto in riferimento ai climi freddi, e le indicazioni seguenti vanno perciò considerate significative soprattutto nella simulazione dei consumi invernali. Sintetizzando, per ciò che riguarda l'edificio, le simulazioni risultano sensibili soprattutto ai seguenti aspetti: il livello di dettaglio della zonizzazione (ma solo con un adeguato livello di dettaglio sugli scambi interzona); la modellazione delle ombre proiettate sull'edificio e delle temperature esterne; la rappresentazione degli scambi con il terreno. Una rilevanza minore, ma ancora significativa, è da attribuire alla modellazione delle proprietà ottiche delle superfici vetrate, della radiazione diffusa e di quella riflessa dal terreno. Poco influente invece il livello di dettaglio nella rappresentazione delle masse termiche interne e della geometria delle finestre, nonché degli scambi radiativi con il terreno. Per ciò che riguarda invece gli impianti, i parametri più significativi sono risultati quelli relativi all'efficienza del generatore, alle impostazioni dei termostati e alla modellazione corretta del rapporto fra scambi convettivi e radiativi nei terminali di distribuzione del calore.

Più in generale, il problema di maggiore complessità che si presenta durante una simulazione è lo studio dei flussi d'aria accoppiato ai calcoli termodinamici, in particolare negli edifici che si avvalgono di sistemi di ventilazione naturale. Di conseguenza, nei modelli attuali, i due aspetti sono ancora integrati in maniera relativamente approssimativa e molte volte la ventilazione viene stimata separatamente e poi inserita come dato di partenza per i calcoli termici successivi.

Al momento la rappresentazione dei flussi viene effettuata secondo tre modalità principali: i metodi semplificati, le reti di nodi e la CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Mentre i primi due consentono una modellazione esplicita nella simulazione termodinamica il terzo è ancora troppo complesso per essere integrato alla stessa maniera.

I metodi semplificati sono quelli che includono nel calcolo alcune grandezze fondamentali come la velocità del vento e la differenza di temperature fra interno ed esterno, ma senza operare in un modello geometrico/spaziale definito.

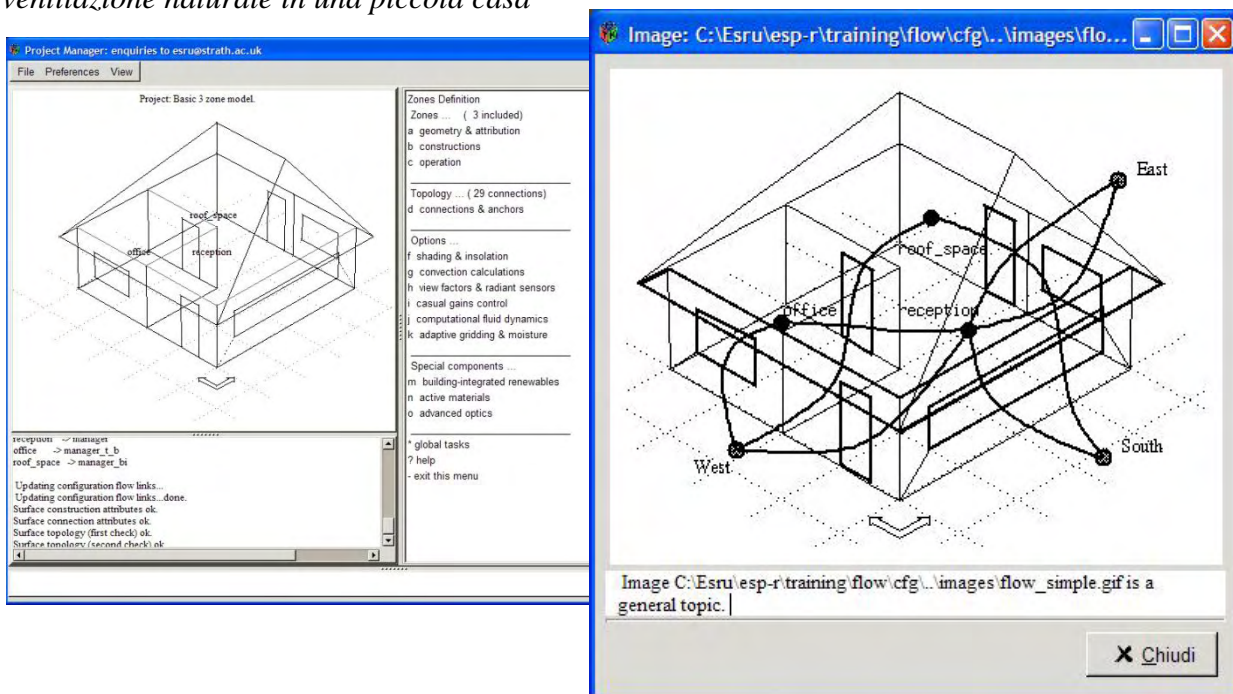
Per le reti di nodi le caratteristiche dell'edificio e dell'aria vengono invece condensate in una serie di entità astratte -i nodi- collegate tra loro. Ogni nodo rappresenta un ambiente o un componente impiantistico, mentre le connessioni tra i nodi servono da modello per le aperture che collegano ambienti e componenti tra loro oppure con esterno, vale a dire elementi come porte, finestre o bocchette di ventilazione. Una volta costruita, la rete viene regolata un sistema di equazioni che rappresenta le pressioni in ogni nodo e impone le leggi di conservazione della massa. Si tratta di un sistema in grado di descrivere i flussi d'aria principali con risorse di calcolo ragionevoli, ma non di rappresentare ciò che accade all'interno di un ambiente.

Per questo è necessaria la CFD, molto più precisa, ma molto più dispendiosa in termini di costruzione del modello e di tempi e potenza di calcolo. Il sistema di equazioni è infatti più complesso e rappresenta fondamentalmente il momento lineare, la massa e l'energia termica in una griglia di nodi, bi- o tri-dimensionale, molto più fitta. Ogni nodo rappresenta infatti non più un intero ambiente ma una ristretta porzione di spazio, la cui dimensione dipende dalla grandezza dello spazio simulato e dalla precisione richiesta al calcolo. Si consideri una semplice stanza quadrata alta 3 m e con un lato di 4 m, per la quale si voglia studiare la ventilazione naturale attraverso due finestre opposte. Volendo rappresentare questa situazione con una rete di nodi avremmo tre nodi, uno nella stanza e due sugli opposti versanti esterni, più due connessioni. Se invece si usasse una simulazione CFD, impostando una griglia tridimensionale da 20 cm, avremmo un totale di 6.000 nodi (20x20x15) solo all'interno della camera, più quelli necessari per definire le condizioni al contorno sui due lati esterni. Questo può dare un'idea della differenza di complessità nel calcolo, anche se nel primo caso il risultato sarebbe limitato al volume d'aria di ricambio mentre nel

¹⁴ Purdy e Beausoleil-Morrison, 2001

secondo si potrebbe conoscere la velocità e la direzione dell'aria in ogni punto della stanza. In realtà esistono diversi algoritmi di CFD in grado di semplificare la procedura evitando un calcolo completo di tutti i nodi¹⁵, ma ciò non elimina la forte disparità fra i due modelli descritti. I nuovi software in via di sviluppo promettono grandi semplificazioni (anche perché l'architettura non ha bisogno dello stesso grado di precisione richiesto per altri scopi), ma al momento l'integrazione organica della CFD in simulazioni complesse non è ancora un risultato acquisito. Le applicazioni della disciplina sono comunque molte e interessanti, per esempio nella progettazione esterna per studiare l'assetto generale dei siti. All'interno degli edifici poi, è la maniera più efficace per valutare la diffusione di inquinanti e fumi e quindi la sicurezza antincendio, ma anche sistemi di ventilazione avanzati, sia naturali che artificiali (come la *displacement ventilation*, per esempio). Per questi ultimi sono in via di sviluppo modelli ad hoc che, insieme alle semplificazioni ed alla parziale automazione nella creazione dei modelli generali e delle griglie, renderanno la CFD più accessibile anche per gli architetti.

rappresentazione grafica e modellazione in ESP-r di una rete di nodi che simula la ventilazione naturale in una piccola casa



Un secondo problema relativo alla simulazione termo-fluidodinamica è la modalità con la quale i due calcoli vengono accoppiati. Le possibilità sono fondamentalmente due: accoppiamento indiretto o diretto. Il primo sistema esclude un accoppiamento interno al software e consiste nell'uso di una o più simulazioni fluidodinamiche per la definizione approssimata degli input da utilizzare in quella termodinamica. Il vantaggio consiste nella maggiore semplicità nella costruzione del modello e nella rapidità nel calcolo per la simulazione finale, nonché nella possibilità di studiare più agilmente i due aspetti presi singolarmente e di utilizzare strumenti non integrabili diversamente allo stato attuale, per esempio proprio la CFD. Per converso sarà necessaria almeno una simulazione in più e

¹⁵ Chen e Zhai, The use of Computational Fluid Dynamics tools for indoor environmental design (in Malkawi e Augenbroe, 2004)

il livello di precisione dipenderà molto dall'esperienza e dalla competenza di chi esegue le analisi e ne riporta i risultati nel modello termodinamico.

La seconda opzione prevede invece l'uso di un programma in grado di gestire entrambi gli aspetti contemporaneamente. I modelli più precisi adottano un approccio iterativo nel quale ad ogni step i due calcoli vengono rinnovati fino a quando non concordano in modo soddisfacente. Quelli più semplici li svolgono invece in sequenza alternata, *a ping pong*, in modo che il risultato di ogni step nel calcolo fluidodinamico sia la base di partenza per il calcolo termodinamico successivo e viceversa. Anche in questo caso ciò che si guadagna in precisione si perde in velocità. La scelta del modello più adatto dipenderà ancora una volta dallo scopo dell'indagine, dalle informazioni e dalle risorse disponibili.

Applicazioni

Il campo di applicazione delle simulazioni dinamiche è piuttosto vasto e coinvolge, oltre alla progettazione architettonica, la ricerca e la sperimentazione, la gestione dell'edificio e le verifiche di conformità alle normative.

Per quanto riguarda la ricerca, un settore interessante è quello che concerne la sperimentazione di sistemi e componenti, che possono essere testati in maniera estensiva, tramite le simulazioni, prima della loro reale realizzazione. Il processo sperimentale è preceduto dalla validazione del modello utilizzato, che deve essere in grado di simulare in maniera accurata tutti gli aspetti rilevanti dell'edificio e dei sistemi sotto esame. La prima operazione necessaria è la calibratura, ovvero l'aggiustamento del modello affinché risulti concorde, ad esempio, con i dati registrati in un esperimento reale su un modello in scala osservato in condizioni controllate. Il modello virtuale calibrato deve essere quindi scalato, vale a dire adattato alle condizioni da simulare, quindi alle dimensioni dell'edificio reale ed a condizioni libere. A questo punto l'esperimento può essere condotto ed eventualmente replicato più volte per testare i sistemi in diverse condizioni climatiche, di utilizzo di dimensione.¹⁶

Un'altra applicazione, ancora non pienamente sfruttata nelle sue potenzialità, è la gestione tramite simulazioni dinamiche dei sistemi di controllo automatizzati. Questi tradizionalmente funzionano in base a regole statiche, reagendo agli stati registrati dell'edificio. In uno schema basato su simulazione invece il sistema sceglie fra le opzioni disponibili in base ad obiettivi, considerando diversi scenari. È in grado cioè di prevedere le conseguenze delle proprie azioni nell'immediato futuro, aumentando l'efficienza generale della gestione. Si pensi ai sistemi di schermatura, che possono essere manovrati non solo in base alle condizioni attuali, ma anche in considerazione degli effetti dell'irraggiamento nel periodo immediatamente successivo. In questo modo non reagiscono al surriscaldamento di un ambiente, ma lo prevengono. Allo stesso modo gli impianti di climatizzazione possono essere manovrati anche in funzione dei tempi di entrata in regime ed alle modificazioni imminenti previste nella situazione dell'edificio. Altri vantaggi possono essere conseguiti nel settore della sicurezza. Per esempio, in caso di incendio le aperture ed i sistemi di ventilazione possono essere manovrati consapevolmente, in modo da evitare la diffusione incontrollata dei fumi e l'alimentazione delle fiamme, ma da garantire allo stesso tempo condizioni accettabili lungo le vie di fuga e nelle zone non interessate dagli eventi.

Un capitolo di stretta attualità è poi quello che riguarda le normative e le certificazioni energetiche. Il crescente contributo richiesto agli edifici, rispetto alle politiche di risparmio energetico messe in campo ormai dai governi di tutti i paesi sviluppati, pone l'esigenza di attestarne le prestazioni in maniera sempre più precisa ed affidabile. Le difficoltà legate alla applicazione delle simulazioni dinamiche in maniera semplice, trasparente e oggettiva rappresentano un ostacolo all'inclusione delle simulazioni dinamiche fra le metodologie ufficiali, ma le cose iniziano ad evolvere anche in questo senso.

La direttiva europea che regola la materia non prescrive una metodologia di calcolo particolare per la stima dei fabbisogni energetici, ma indica solo alcuni criteri generali, lasciando il resto al livello legislativo nazionale o regionale (Capitoli 1 e 3). Anche se in Italia per ora non sono previste metodologie basate sulla simulazione dinamica, segnali arrivano da altri paesi, come la Germania dove nel 2007 è stata emanata la norma DIN 18599, per la stima dei fabbisogni energetici dell'edificio. I diversi fabbisogni, ricavati da calcoli dinamici, sono poi ricondotti all'energia primaria tramite l'utilizzo di fattori per ogni tipo di consumo e la prestazione dell'edificio è valutata per comparazione con quella di un caso di riferimento generato automaticamente volta per volta.¹⁷

¹⁶ Strachan, 2008

¹⁷ Reiser, 2008

Il caso più significativo però è probabilmente quello della California, da molti anni ormai all'avanguardia nel campo dell'efficienza energetica, della ricerca e delle normative. La legge statale che regola la materia, il Title 24, ha fruttato secondo la Energy Commission un risparmio energetico pari a 56 mld di dollari a partire dal 1978 e, grazie ai regolari aggiornamenti negli standard, si stima di evitare costi per altri 23 mld entro il 2013. All'efficacia crescente della norma non corrisponde però un'eccessiva rigidità. Attualmente infatti, ad un approccio prescrittivo classico, che riguarda i requisiti minimi dei singoli componenti edilizi, ne è stato affiancato uno prestazionale, che si avvale proprio delle simulazioni dinamiche. In sostanza, se si dimostra di riuscire ad ottenere prestazioni conformi alle richieste con soluzioni e componenti diversi da quelli standard, si può comunque essere in regola con la legge. Simulazioni non obbligatorie quindi, ma nemmeno completamente inutili ai fini della legge. Chi decide di percorrere questa strada accetta un aggravio nel lavoro di verifica, ma ne guadagna in libertà progettuale e sperimentale. Per le simulazioni è indicato un software di riferimento riconosciuto dalla commissione (*eQuest*), ma ancora una volta non si tratta di un obbligo assoluto. Se si desidera utilizzarne di diversi è infatti possibile sottoporre lo strumento prescelto ad una procedura di validazione che prevede 150 test su casi conformi predefiniti dalla commissione stessa. Ancora una possibilità di svincolarsi dalla metodologia ufficiale a patto che si accetti l'ulteriore carico in termini di lavoro e risorse, necessario a garantire la serietà e l'attendibilità delle verifiche. Si tratta dunque di un dispositivo rigido nei risultati ma flessibile nel metodo, che riesce a garantire uno standard elevato con strumenti semplici per l'edilizia più ordinaria, ma che al contempo non inibisce l'innovazione che può scaturire proprio da risposte alternative alle richieste stringenti della normativa. E' un modello intelligente, che evita di uniformare tutti verso il basso.

Questi fatti rappresentano dei progressi importanti, ma sarebbe auspicabile l'adeguamento di tutte le normative alle possibilità offerte dagli strumenti informatici oggi disponibili, che consentono, come si è visto, di migliorare i risultati prodotti da norme altrimenti inutilmente rigide, che rischiano di ostacolare la ricerca e l'innovazione.

La progettazione, in tutte le sue fasi, rimane comunque la questione centrale e come tale anche una delle più dibattute, sia in merito al ruolo che alle modalità di intervento delle simulazioni all'interno del processo progettuale più vasto.

Una prima questione riguarda i soggetti deputati ad eseguire le analisi. Potrebbero essere gli stessi progettisti, con il vantaggio di avere integrazione ed immediatezza massime rispetto all'evoluzione del progetto, ma perdendo in precisione, o una figura esterna. In questa seconda ipotesi, il succedersi di verifiche ed evoluzioni progettuali è più rigido, ma in compenso si può contare su una competenza ed un'attendibilità maggiori, indispensabili nella gestione dei problemi più complessi. In questi casi anche la semplice lettura dei risultati, come si è visto, può richiedere una consapevolezza, sia rispetto ai problemi esaminati che agli strumenti utilizzati, che solo uno specialista può garantire. Per di più, le nuove tecnologie legate ad internet rendono possibile interagire in tempo reale con professionalità operanti ovunque nel mondo e di avere così a disposizione un sistema di competenze altamente specializzato e diversificato. Grazie alle stesse tecnologie è possibile anche l'esecuzione di simulazioni remote, intese non necessariamente come analisi svolte a distanza da qualcun altro, ma anche come operazioni eseguite dal progettista con l'ausilio di risorse (applicazioni, capacità di calcolo, consulenze) dislocate fisicamente in un luogo diverso da quello in cui si opera. Anche in questo caso si tratta di una visione che privilegia lo sviluppo di un sistema organizzato ed efficiente piuttosto che l'accentramento (che non può essere illimitato) di competenze e strumenti in un'unica figura o in un team comunque ristretto. Un esempio interessante è quello del *MIT Design Advisor*, uno strumento di simulazione semplificato sviluppato e messo a disposizione dal Massachusetts Institute of Technology di Boston. Il programma viene eseguito direttamente on line e l'utente non ha bisogno che di un collegamento internet. Non è necessario acquistare licenze, non servono computer potenti e sono sufficienti conoscenze di base della materia. Lo strumento, pensato per aiutare i progettisti nelle fasi di

progetto preliminare, non è naturalmente in grado di restituire i risultati dei software più complessi, ma richiede alla stesso tempo sforzi notevolmente ridotti, ponendosi come un valido esempio di ottimizzazione delle risorse e dei tempi in relazione agli scopi da raggiungere. La considerazione non è banale, anche perché proprio le difficoltà legate ad un uso proficuo delle simulazioni nelle prime fasi del progetto sono state finora fra i fattori limitanti del loro utilizzo. Molti programmi infatti, pensati al di fuori delle logiche proprie del progetto di architettura, sono strutturati in modo da risultare utili solo in una fase avanzata (quando le decisioni più importanti sono ormai consolidate), perché solo a questo punto sono disponibili le informazioni necessarie alla costruzione del modello.

L'utilizzatore finale del programma naturalmente influenza anche il modo in cui questo viene concepito. Al momento la tendenza in crescita sembra quella di semplificare per rendere i sistemi accessibili ad una base più ampia di professionisti, sia lavorando sulle interfacce grafiche, sia integrando parti semplificate dei motori di simulazione in programmi di modellazione generica.. Su ciò pesano probabilmente ragioni commerciali, ma anche il fatto che i software più specialistici, il cui sviluppo comunque non è rallentato, sono già disponibili in misura sufficiente.

Il tipo di strumento e di utilizzatore comunque non esauriscono la questione e negli ultimi anni numerosi interventi si sono concentrati riguardo al momento ed al modo più proficuo in cui far intervenire le simulazioni nel progetto. L'idea vincente in generale, ora che l'ampiezza dell'offerta lo consente, sembra essere quella della diversificazione. Un'ampia scelta di strumenti diversi consente infatti una collaborazione proficua durante tutto l'iter progettuale. Le verifiche possibili e utili variano nel corso di tale iter e lo stesso devono fare le modalità con cui vengono eseguite. Allo stadio del *conceptual design*, per esempio, si possono studiare con successo le interazioni dell'edificio (nei suoi assetti generali) con le condizioni microclimatiche, mentre le simulazioni termiche interne, anche approssimative iniziano ad avere senso solo in una fase più avanzata. Con un progetto ormai definito negli aspetti più importanti, simulazioni più precise e complesse potranno infine ottimizzare il sistema edificio-impianti anche nei dettagli fornendo informazioni che nessuna altro strumento è in grado di elaborare

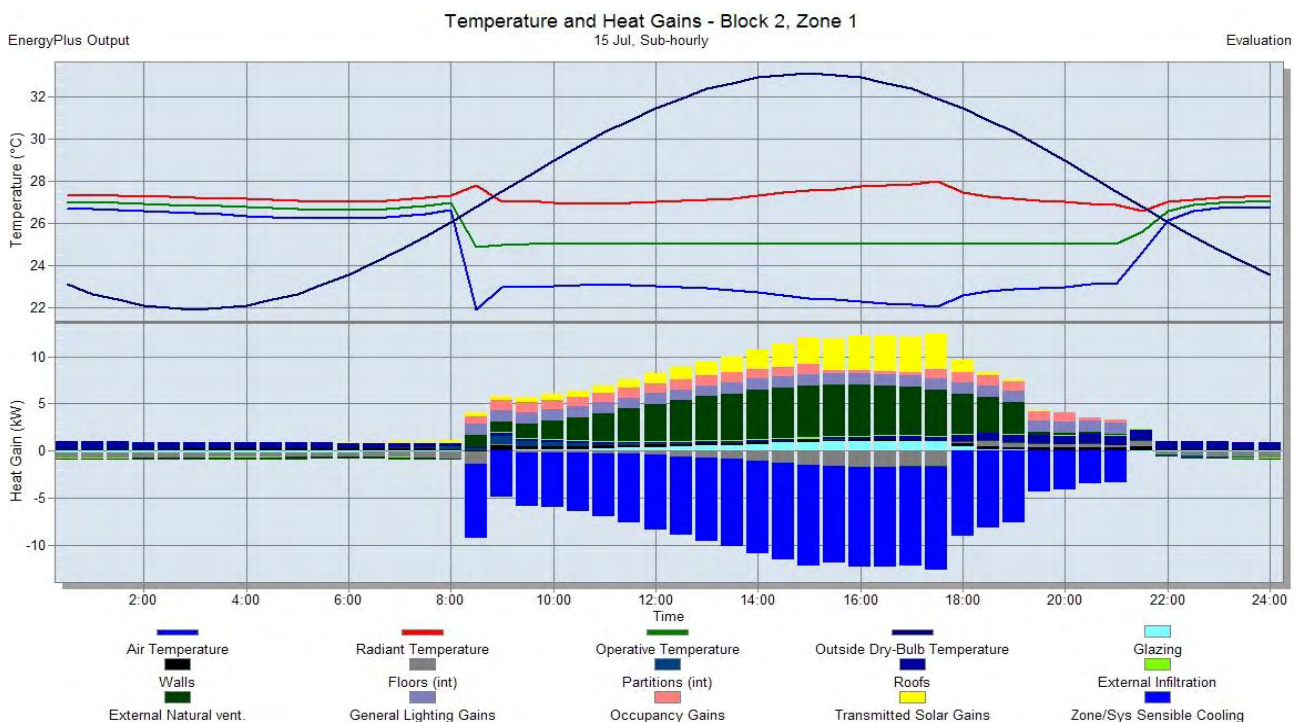


grafico dei risultati orari di una simulazione dinamica: oltre all'andamento dei carichi termici, in questo caso è possibile analizzare le variazioni nella temperatura radiante, dell'aria e operante

Ad ogni modo, la maniera reale in cui vengono gestiti i progetti, soprattutto in una situazione come quella italiana, caratterizzata da una miriade di piccole realtà e pochi grandi studi, è difficilmente riconducibile a modelli prestabiliti e strutturati in modo coerente, e spesso è determinata da ragioni contingenti e imprevedibili. Inoltre non sempre è necessario, o possibile, sfruttare tutte le possibilità di cui si dispone in teoria. Anche per questo un'ampia flessibilità è auspicabile e può contribuire a migliorare il funzionamento complessivo di un sistema con tali caratteristiche.

Perché tutte le applicazioni siano sfruttate al meglio è necessario però che si realizzino una serie di condizioni preliminari, prime tra tutte quelle che riguardano la produttività degli strumenti e la qualità dei risultati. I rapidi sviluppi nell'offerta di strumenti nuovi, di più semplice e rapido utilizzo promettono di affrontare con successo la sfida della produttività e di favorire una più ampia diffusione di queste metodologie, con tutti i vantaggi ed i problemi già discussi. È naturalmente un fatto positivo, ma per un altro verso rende ancora più stringente la seconda condizione di base: la *quality assurance*. La garanzia di qualità passa attraverso la formazione di professionalità competenti -indispensabili, come si è visto, nella manipolazione di modelli tanto complessi e delicati- ma anche attraverso una rigorosa validazione degli strumenti. Questa può essere effettuata in più modi e dovrebbe chiarire non solo la loro affidabilità, ma anche il dominio all'interno del quale essa rimane valida. La procedura più efficace è probabilmente quella empirica, che consiste nel confrontare i risultati delle simulazioni con i dati registrati in un esperimento reale (che può avvenire anche nel monitoraggio di edifici esistenti non appositamente realizzati). I punti deboli di questo sistema sono ovviamente legati alla sua realizzazione pratica: il numero limitato di esperimenti possibili, i tempi e i costi necessari. Una strada decisamente più percorribile è quella della validazione per via analitica o comparativa, in cui i risultati vengono confrontati con quelli di uno o più sistemi già validati e accettati. Nel caso specifico, la procedura più accreditata in campo internazionale è la BESTEST (Building Energy Simulation TEST), messa appunto per la IEA (International Energy Agency) dal NREL (National Renewable Energy Laboratory) in Colorado, Usa. Si tratta di un metodo comparativo che verifica i nuovi strumenti sulla base dei risultati di simulazioni condotte su un elevato numero di casi standard appositamente progettati.

Nonostante alcuni nodi ancora da sciogliere, l'evoluzione in corso sembra dunque indirizzata verso uno sviluppo rapido e sempre più integrato nel mondo della progettazione architettonica. Tuttavia, perché tale processo abbia successo, sarà necessario che anche gli architetti si preparino a confrontarsi con quelli che sembrano ormai destinati a divenire strumenti indispensabili per una progettazione adeguata ai tempi, tecnologicamente avanzata, consapevole e sostenibile.

Una selezione critica di software

In conclusione si è ritenuto utile fornire un elenco di alcuni fra i principali programmi disponibili per lo studio e la valutazione delle prestazioni degli edifici. Le informazioni non hanno la pretesa di fornire un quadro completo ed esaustivo, ma semplicemente una panoramica generale. La prima selezione riguarda una serie di software specifici per le simulazioni dinamiche, la seconda prende in considerazione quelli utilizzati per la fluidodinamica, mentre l'ultima è relativa ad alcuni strumenti utili in diversi campi correlati. Ogni programma è presentato per mezzo di poche informazioni essenziali e dei riferimenti su internet.

- Prestazioni energetiche e ambientali degli edifici

ESP-r

<http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>

È sviluppato dall' Energy Systems Research Unit della University of Strathclyde in Scozia. Programmato originariamente per linux ma disponibile anche in versione Windows, è distribuito in modalità open source, consentendo a chiunque di modificare e sviluppare liberamente il programma. Ha un modulo di fluidodinamica in grado di modellare i flussi d'aria interni/esterni e si propone di diventare strumento integrato per la simulazioni delle performance termiche, visive ed acustiche degli edifici.

TRNSYS

<http://www.trnsys.com/>

Nasce da un progetto della University of Wisconsin a Madison, USA ed è sviluppato da un joint team internazionale americano ed europeo. È considerato uno dei sistemi più avanzati oggi in commercio, anche grazie alla sua struttura estremamente flessibile che consente di sviluppare sottosistemi adatti a qualsiasi esigenza. Più che un singolo programma, è una suite di applicazioni in grado di richiamare anche software esterni come Matlab, Excel, Comis, Contam, Fluent, e grazie a questa caratteristica può ad esempio effettuare analisi avanzate sui fenomeni termici ed i flussi d'aria combinati.

eQuest

<http://www.doe2.com/eQUEST/>

Come i suoi predecessori (DOE-2 e PowerDOE), è sviluppato dal dipartimento per l'energia degli Stati Uniti e dal Lawrence Berkeley National Laboratory in California ed è basato su DOE-2. È abbastanza agevole da usare ed è dotato di una doppia interfaccia (semplificata e dettagliata), che consente diversi livelli di utilizzo. Può effettuare analisi parametriche e consente controlli molto avanzati (in alcuni casi anche di carattere probabilistico) su parecchi aspetti della simulazione. Controlla illuminazione e daylighting ed esegue analisi di conformità alla legge californiana. Ha funzionalità fluidodinamiche semplificate e non calcola temperature e indici di comfort. Adatto anche alla didattica.

EnergyPlus

<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

È sviluppato dal dipartimento per l'energia degli Stati Uniti e dal Lawrence Berkeley National Laboratory. È uno dei software più avanzati in circolazione, anche se non ha un'interfaccia agevole ed è di difficile utilizzo. Consente Simulazioni molto dettagliate su tutti gli aspetti termici ed energetici dell'edificio, può controllare illuminazione artificiale e daylighting e calcola diversi indici di comfort termico. Ha al suo interno un modulo fluidodinamico (rete di nodi) che può essere utilizzato sia per la ventilazione naturale che per quella meccanica.

DesignBuilder

<http://www.designbuilder.co.uk/>

É un interfaccia grafica per EnergyPlus (attraverso il quale vengono effettuati quasi tutti i calcoli), semplifica alcune operazioni di modellazione ma non consente di accedere a tutte le funzioni del programma originale. E' particolarmente interessante integrazione di un modulo CFD per la ventilazione esterna ed interna all'edificio in grado di recepire informazioni dal modello termodinamico (ma non di fornirgliene).

Virtual Environment

<http://www.iesve.com/software>

É un pacchetto di simulazione integrata delle prestazioni energetiche ed ambientali degli edifici che comprende anche le verifiche di conformità ad alcuni protocolli di certificazione ambientale. Integra un modulo CFD con caratteristiche simili a quelle di DesignBuilder.

ECOTECT

<http://www.squ1.com/products/ecotect>

É un software sviluppato nel Regno Unito dalla compagnia australiana Square One Research ed è utile per simulare le prestazioni termiche, acustiche e visive dell'edificio, anche richiamando programmi esterni (tra i quali EnergyPlus ed ESP-r). È particolarmente versatile nelle analisi solari ed in generale nelle fasi iniziali della progettazione. Ha probabilmente l'interfaccia grafica più vicina alla sensibilità degli architetti.

- Simulazioni Fluidodinamiche

COMIS

<http://epb.lbl.gov/comis/>

É un software per la modellazione dei flussi d'aria e della diffusione dei contaminanti sviluppato nel Lawrence Berkeley National Laboratory in California fra il 1989 ed il 1998. E' disponibile con diverse interfacce (IISiBat per Windows) ed è stato il modulo fluidodinamico in alcune versioni precedenti di EnergyPlus. Produce output numerici.

CONTAM

<http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/CONTAM/index.htm>

É sviluppato dal National Institute of Standards and Technology degli Stati Uniti per l'analisi della ventilazione e della qualità dell'aria in edifici multizona. Produce output numerici.

ANSYS / COMSOL

<http://www.ansys.com/>

<http://www.comsol.com/>

Sono esempi di modellazione multifisica. Si tratta di software utilizzati perlopiù nella ricerca e nella progettazione ingegneristica e industriale, in grado di analizzare, simulandoli, processi complessi che coinvolgono diversi campi della fisica. I modelli che includono simulazioni termodinamiche e fluidodinamiche si prestano anche allo studio dei flussi di aria ed energia negli edifici. Il loro utilizzo richiede comunque competenze specifiche.

- *Altri Software correlati*

LEARNIX

<http://luminance.londonmet.ac.uk/learnix/>

É una distribuzione Linux basata sulla più nota UBUNTU e sviluppata dal LEARN (Low Energy ARchitecture uNnit) della Metropolitan University of London. E' un sistema operativo funzionante sia come Live CD che tramite istallazione, e incorpora un pacchetto di software per l'architettura (tutto sotto licenza Open Source), tra cui ESP-r e Radiance, per la simulazione di diversi aspetti fisici relativi agli edifici.

SOFTWARE LBNL (Therm - Optics - Window)

<http://windows.lbl.gov/software/software.html>

Si tratta di una suite di programmi sviluppata dal Lawrence Berkeley National Laboratory per lo studio e della trasmissione del calore in elementi bidimensionali, dei fenomeni ottici relativi al vetro e delle proprietà termofisiche delle finestre. Possono essere utili sia nell'analisi di singoli elementi costruttivi che nella creazione di macro da esportare verso applicazioni adatte alla simulazione dinamica degli edifici.

ENVIMET

<http://www.envi-met.com/>

Sviluppato in Germania da un team di ricercatori dell'Istituto Geografico della *Johannes Gutenberg - Universität Mainz*, è un modello di simulazione per analisi tridimensionali su micro-clima e comfort negli spazi aperti, che può rivelarsi particolarmente utile durante gli studi preliminari e per la definizione delle condizioni al contorno del modello di un edificio. Integra un software specifico, Leonardo, per la visualizzazione dei risultati.

5. Casi applicativi: la valutazione di alcuni sistemi passivi

Vengono illustrati alcuni casi reali nei quali l'autore della ricerca si è occupato di valutare le prestazioni energetiche di edifici italiani che utilizzano sistemi di controllo passivo per mezzo di simulazioni dinamiche. Le valutazioni sono state principalmente di supporto alla progettazione. Il capitolo ha lo scopo di descrivere la metodologia utilizzata e di dimostrare la rilevanza del potenziale contributo dei sistemi passivi all'efficienza energetica in area mediterranea.

5. Case studies: the assessment of some passive systems

Some real cases are exposed in which the author of the research assessed the energy performance of buildings featuring passive systems by means of dynamic simulations. Assessments were mainly in support of design. The chapter is aimed at describing the methodology applied and demonstrating the potential contribution of passive systems to energy efficiency in the Mediterranean area.

Metodologia di valutazione

Sono qui presentati una serie di casi di studio dai quali è possibile desumere il potenziale, in termini di efficienza energetica e comfort ambientale, dell'utilizzo dei sistemi passivi in edifici italiani di recente progettazione. I casi descritti consentono inoltre di comprendere meglio alcune possibili applicazioni delle simulazioni dinamiche in supporto alla progettazione architettonica.

La procedura di valutazione adottata si avvale delle simulazioni dinamiche e prevede la verifica del comportamento dell'edificio in diversi assetti che includono o meno l'utilizzo dei sistemi passivi. Analizzando le differenze prestazionali fra le diverse soluzioni è possibile stimare il contributo dei sistemi passivi.

I fabbisogni energetici a cui si farà riferimento sono sempre di tipo *termico*, indicano cioè la quantità di energia che è necessario apportare o sottrarre per mantenere gli ambienti nelle condizioni imposte. Non si tiene dunque conto del tipo di sistema impiantistico e di alimentazione, limitandosi a studiare il comportamento *passivo* dell'edificio nelle condizioni climatiche in cui opera. Nelle simulazioni effettuate, tuttavia è necessario modellare una sorta di impianto fittizio che fornisca questa energia. Lo stesso è considerato di potenza illimitata e non è caratterizzato da sottosistemi o perdite di energia. Tale forzatura si rende necessaria perché se non si fornisse l'energia necessaria agli ambienti il bilancio che ne deriverebbe non sarebbe realistico, i fabbisogni degli *step* successivi risulterebbero alterati e non si potrebbe tener conto dell'inerzia termica dell'organismo edilizio. Inoltre non sarebbe possibile valutare le condizioni ambientali interne dell'edificio climatizzato.

In termini energetici il contributo dei sistemi passivi è stimato come lo scarto fra i fabbisogni dell'edificio (fittizio) privo degli stessi e di quello che ne è dotato.

Dal punto di vista del comfort ambientale si è operata in maniera simile, ma allargando il campo di verifica. Infatti, l'analisi delle prestazioni delle due soluzioni ipotizzate potrebbe non essere molto significativa proprio a causa della presenza dell'impianto (sia pure fittizio) che tende naturalmente ad uniformare le condizioni interne, pur impiegando diverse quantità di energia. Ciò nonostante è piuttosto comune che gli edifici dotati di sistemi passivi facciano registrare condizioni migliori, soprattutto quando il controllo impiantistico opera in maniera intermittente. Infatti la migliore interazione con le condizioni esterne produce spesso una stabilizzazione delle condizioni interne, riducendo l'escursione termica e attenuando i picchi delle temperature massime e minime. Ad ogni modo, per ovviare agli inconvenienti menzionati, in alcuni casi si è simulato anche il comportamento dei due edifici fittizi in assenza totale di controllo impiantistico. Ciò consente di monitorare l'andamento delle condizioni interne in un regime completamente passivo e di apprezzare meglio le differenze fra le diverse soluzioni progettuali. Lo stesso si verifica durante le mezze stagioni, quando, perlomeno per quanto riguarda gli edifici residenziali nel clima italiano, gli impianti sono abitualmente spenti.

L'intervento delle simulazioni in fase di progettazione ovviamente non permette semplicemente di valutare in maniera secca due alternative configurate a priori, ma anche di ottimizzarne e calibrarne le soluzioni o di elaborarne delle nuove a partire dai dati a disposizione. Nei casi riportati di seguito verranno esposti anche risultati di questo tipo.

Saranno inoltre considerati anche altri strumenti di analisi che servono da supporto o da ausilio alle simulazioni dinamiche, che rimangono la metodologia principale adottate in tutti i casi illustrati.

Tutte gli studi, le analisi, e le simulazioni riportati sono stati condotti dall'autore di questa tesi.

Potenzialità dei sistemi passivi e applicazioni delle simulazioni dinamiche in area mediterranea

A. RESIDENZE SPERIMENTALI A MONTEROTONDO



Anno	2007
Località	Monterotondo (RM)
Tipologia	Residenziale
Progetto	Architettonico: Lorenzo Cortesini, Battisti Tucci Architetti Associati
	Impianti: Areatec srl
Analisi/simulazioni	Marco Cimillo

Si tratta di un edificio di edilizia residenziale pubblica che ospita 18 alloggi per una superficie totale (residenziale) di circa 1.500 mq. È stato realizzato in località Cappuccini.

Oltre ad un involucro particolarmente prestante, l'edificio si avvale per il riscaldamento passivo di una grande atrio-serra contiguo agli spazi comuni di distribuzione e di una serie di piccole serre solari a servizio dei singoli alloggi, nelle quali sono integrati dei muri di Trombe-Michelle. È inoltre presente un sistema di sei condotti interrati per il pre-riscaldamento/raffrescamento dell'aria di rinnovo degli appartamenti, tutti dotati di ventilazione controllata.

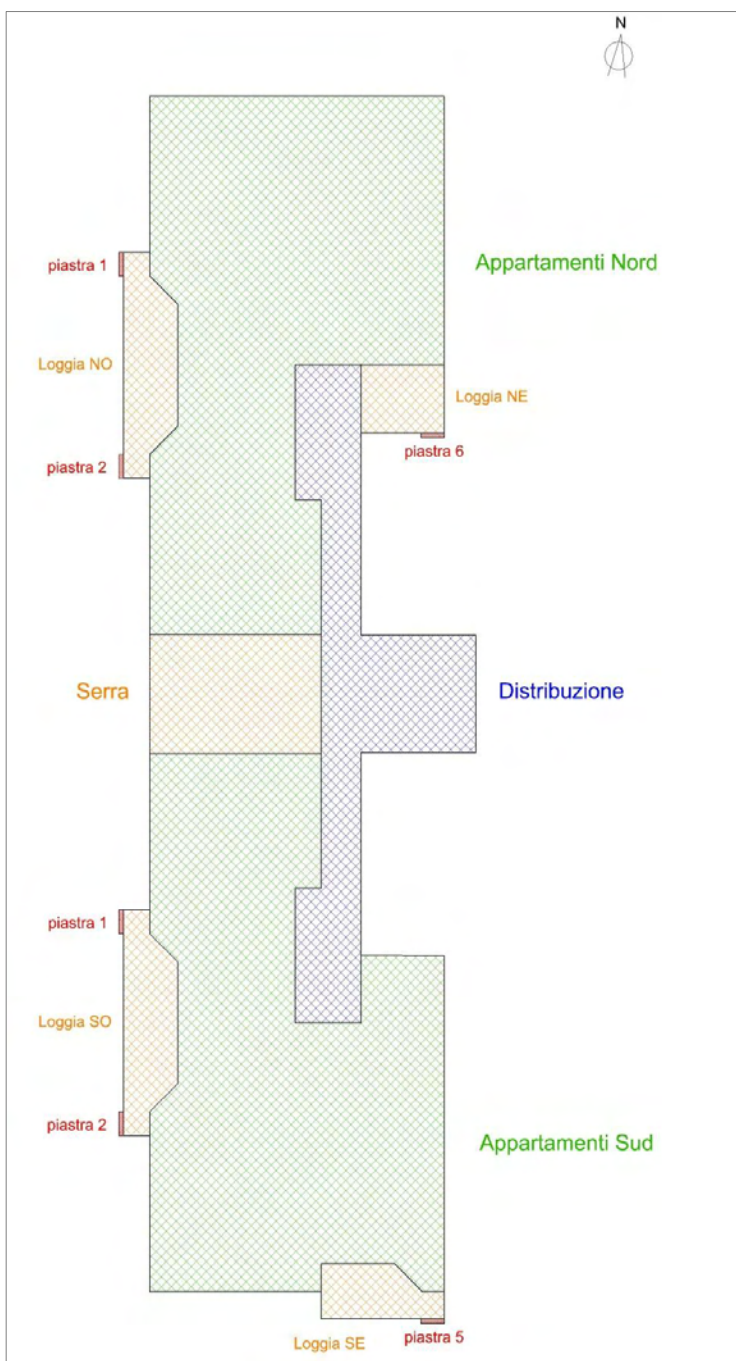
In fase di progettazione si è proceduto ad una serie di simulazione per verificare e ottimizzare le soluzioni previste. Di seguito sono sintetizzate le principali caratteristiche del sito e dell'edificio ed i risultati più significativi.

Stazione Meteo: **Roma Urbe** 41,95° N, 12,50° E - 24 m s.l.m

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Tmax (°C)	12	14	16	19	24	28	31	31	28	23	17	13
Tmed (°C)	7	8,5	10,5	13	17,5	21	24	24	21	16,5	11,5	8
Tmin (°C)	2	3	5	7	11	14	17	17	14	10	6	3
U.R. (%)	79	75	72	72	72	70	68	69	71	75	79	80
Vel. Vento (m/s)	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	2,6	2,6
Rad. Glob. (W/mq/gg)	1.670	2.290	3.660	4.980	6.010	6.610	6.630	5.850	4.510	3.060	1.930	1.470



rendering di progetto sul fronte ovest, che ospita le superfici captanti dei sistemi solari passivi



schema della suddivisione in zone termiche

Caratteristiche termo fisiche degli elementi costruttivi

Elemento \ Caratteristiche		Spessore [m]	Conduct. [W/(m*K)]	MassaVol. [kg/m ³]	Cal. Spec. [J/(kg*K)]
Coperture Appartamenti e Distribuzione	acciaio zincato	0,0015	80	7.450	425
	fibra di cellulosa	0,160	0,400	840	150,7
	laterocemento	0,230	0,800	1.000	880
Coperture Serra	fibra di cellulosa	0,120	0,400	840	150,7
	cls di argilla espansa	0,080	0,390	880	1.200
	pannelli di fibre di legno	0,020	0160	900	800
Pareti Esterne	intonaco di cemento e sabbia	0,030	0,900	1800	910
	fibra di cellulosa	0,120	0,400	840	150,7
	laterizio	0,300	0,590	1.600	840
	intonaco di calce e gesso	0,020	0,700	1.400	1.700
Pareti Piastre Termiche (coeff. assorbimento strato esterno: 0,85)	laterizio	0,100	0,590	1.600	840
Pareti Interne	intonaco di calce e gesso	0,020	0,700	1.400	1.700
	laterizio	0,150	0,590	1.600	840
	intonaco di calce e gesso	0,020	0,700	1.400	1.700
Solaio piano terra	laterocemento	0,230	0,800	1.000	880
	fibra di cellulosa	0,080	0,400	840	150,7
Solai Interni		0,300	0,800	1.000	880
Solaio piano seminterrato*		0,300	0,800	1.000	880
Vetri appartamenti**		0,060	0,900	-	-
Vetri Serra, logge e distribuzione		0,004	1,000	-	-

* le intercapedini sono modellate separatamente dalle strutture

** I valori si riferiscono ad un singolo strato di vetro; le superfici vetrate sono composte da un doppio vetro (quello esterno basso-emissivo) con interposto uno strato d'aria di 13mm

Il comportamento dell'edificio è stato simulato con e senza i diversi sistemi passivi per valutare le prestazioni energetiche e, in entrambi i casi, con e senza l'intervento degli impianti per avere un quadro più preciso del comfort all'interno degli alloggi.

CONSUMI SPECIFICI valutazione sistemi solari	Senza Sistemi Solari	Con Sistemi Solari	Risparmio
Riscaldamento [kWh/m ²]	23,93	16,78	29,88%
Condizionamento [kWh/m ²]	15,64	15,98	-2,20%
Totale climatizzazione [kWh/m ²]	39,57	32,76	17,20%

Nonostante le superfici captanti non possano godere di un'esposizione solare ottimale (sono rivolte principalmente a ovest), l'uso dei sistemi solari garantisce un risparmio sui fabbisogni invernali di quasi il 30% e comportano un aggravio di quelli estivi di solo il 2%. Terminata la stagione di riscaldamento le vetrate delle serre possono infatti essere aperte garantendo una buona ventilazione naturale degli spazi serra e di quelli serviti. In più gli aggetti dei solai e le rientranze verticali delle serre forniscono una parziale schermatura solare per le superfici vetrate più interne. I muri di Trombe-Michelle vengono invece disattivati mediante la ventilazione dell'intercapedine e la schermatura della superficie assorbente per mezzo di una tenda chiara e riflettente a rullo. Per questi ultimi sono state testate varie configurazioni, ottenendo i risultati sintetizzati nella seguente tabella.

Tabella comparativa muri Trombe-Michelle

	Parete semplice (parete esterna isolata)	Vetrata semplice (vetro doppio)	Muro trombe non ventilato con vetro singolo	Muro trombe non ventilato con vetro doppio	Muro trombe ventilato con vetro singolo	Muro trombe ventilato con vetro doppio	Muro trombe ventilato con vetro singolo e protezione estiva
Temp media annuale loggia NO [°C]	19,98	19,51	20,65	20,50	20,65	20,49	20,23
Temp massima annuale Piastra 1 [°C]	-	-	45,90	51,23	44,51	49,06	39,78
Riscaldamento [kWh/m ²]	17,27	18,37	16,79	16,91	16,77	16,88	16,78
Condizionamento [kWh/m ²]	15,96	15,76	16,66	16,46	16,69	16,49	15,98
Totale climatizzazione [kWh/m ²]	33,22	34,13	33,45	33,37	33,47	33,37	32,76

Prestazioni migliori

Prestazioni Peggiori

Per quanto riguarda il sistema di areazione, i condotti interrati forniscono l'aria di rinnovo, mentre quella di estrazione è espulsa in copertura. I due percorsi sono integrati in un sistema di torri di ventilazione. Le caratteristiche dei condotti ed i contributi energetici sono riassunti nelle due tabelle che seguono.

Caratteristiche dei condotti interrati

Diametro [m]	0,35	Portata [m ³ /s]	0,078 (x6)
Spessore [m]	0,0087	Velocità aria [m/s]	0,8
Lunghezza media [m]	Nord:57(x3); Sud:30(x3)	Ventilazione	forzata
Profondità [m]	2	Condutt [W/(m*K)]	0,35

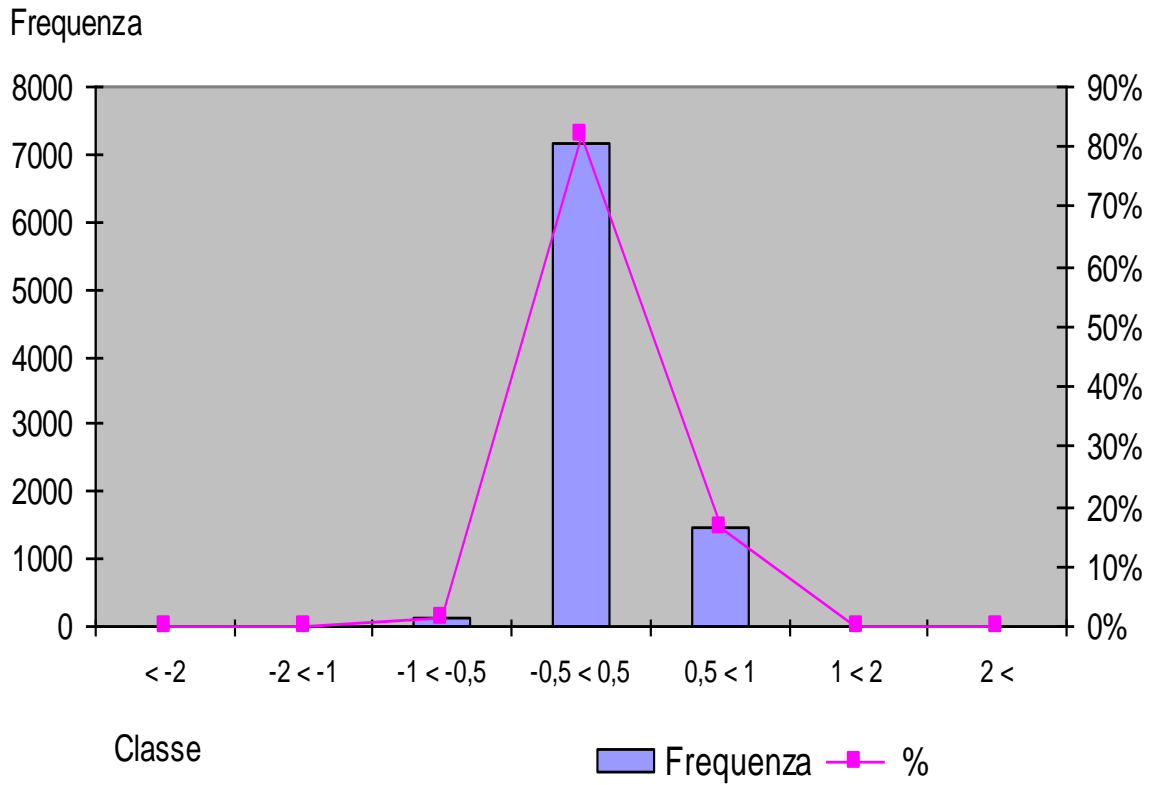
CONSUMI SPECIFICI valutazione condotti interrati	Senza Condotti interrati	Con Condotti interrati	Risparmio
Riscaldamento [kWh/m ²]	21,26	16,78	21,07%
Condizionamento [kWh/m ²]	19,01	15,98	15,92%
Totale climatizzazione [kWh/m ²]	40,27	32,76	18,64%

Dopo aver verificato i risultati dei sistemi in termini energetici si è valutata la situazione del comfort ambientale all'interno degli alloggi. A tal fine è stata analizzata la distribuzione del PMV¹⁸ medio nei due blocchi di alloggi (nord e sud). Si è presa in considerazione sia la situazione *reale* con controllo integrato di impianti-sistemi solari-condotti interrati, sia una condizione ipotetica con controllo totalmente bioclimatico (in questa ipotesi è incluso comunque il funzionamento dei condotti interrati e relativo sistema di ventilazione forzata). Quest'ultima verifica è stata effettuata per avere un quadro più completo delle prestazioni passive dell'edificio. I risultati sono riassunti nella tabella sottostante e rappresentati nei seguenti istogrammi di frequenza. L'esito della verifica è positivo e indica che anche in assenza di impianti all'interno dell'edificio si raggiungono condizioni di confort ottimali mediamente durante circa il 63% del tempo e comunque buone per più dell'80% delle ore nel corso dell'anno.

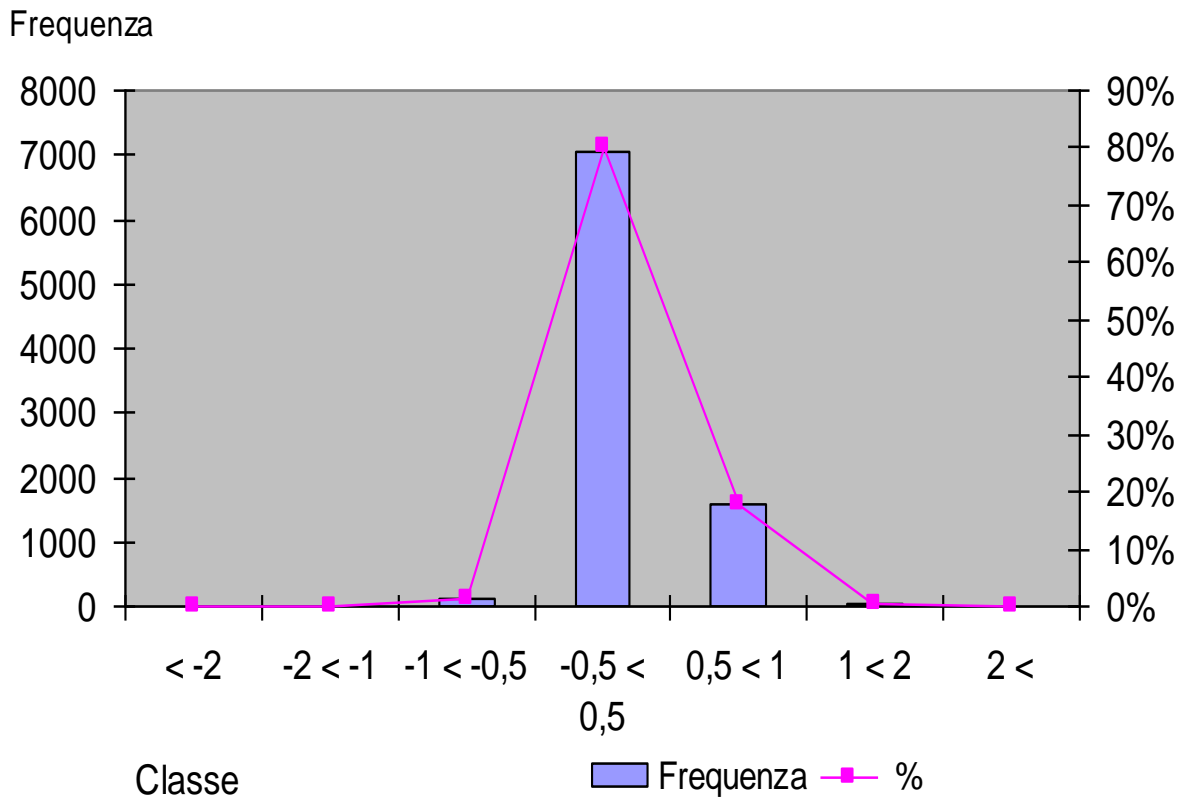
FREQUENZE %	nord contr. integrato	sud contr. integrato	nord senza impianti	sud senza impianti
Int. ottimale (-0,5<pmv<0,5)	81,85	80,30	65,55	61,24
Int. accettabile (-1<pmv<1)	99,79	99,69	92,61	91,84

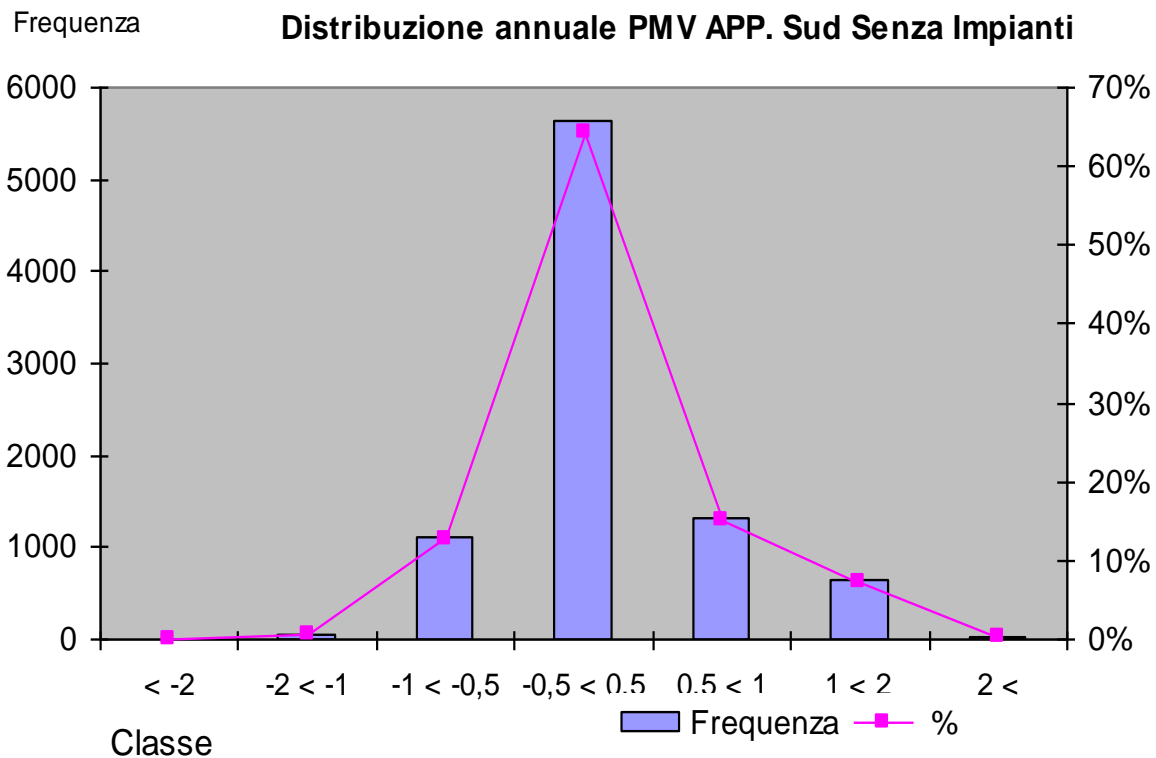
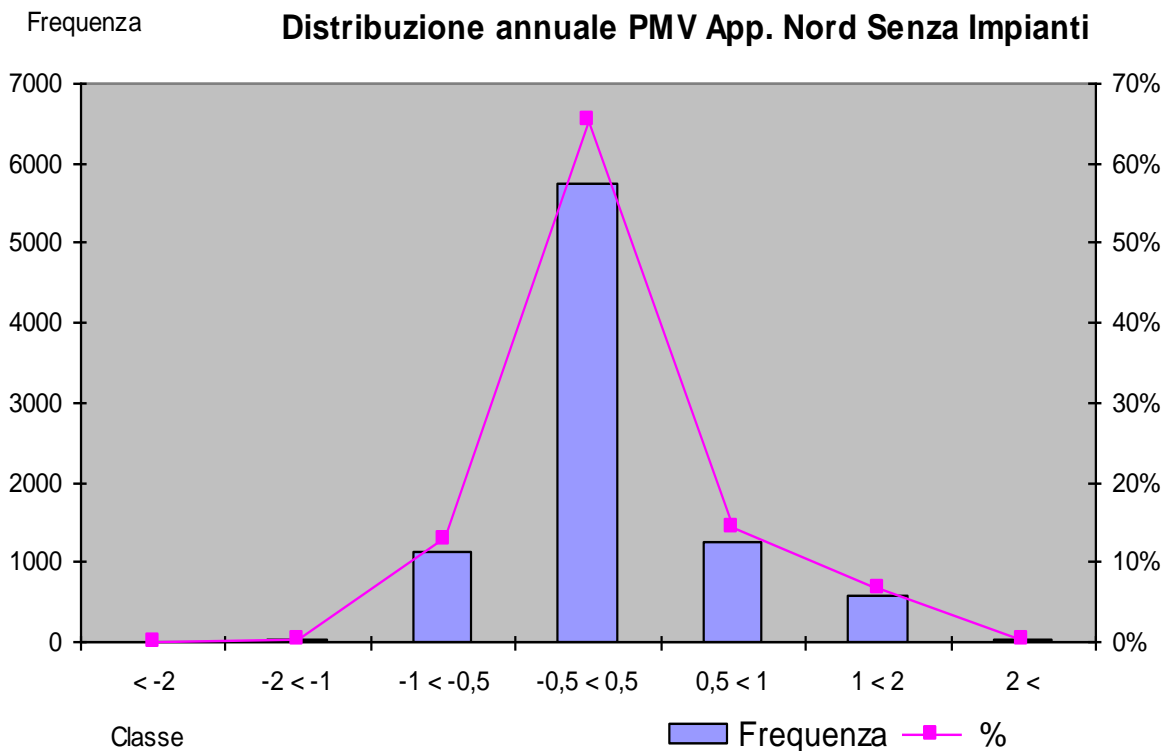
¹⁸ *Predicted Mean Vote*: è il principale indice di comfort in uso; elaborato da Povl Ole Fanger, predice le sensazioni di comfort termico in determinate condizioni ambientali (temperatura, umidità, velocità dell'aria) e soggettive (abbigliamento, attività metabolica). La scala prevede valori compresi fra -3 (molto freddo) e 3 (molto caldo), il *range* ottimale è compreso fra -0,5 e 0,5 e quello di accettabilità tra -1 e 1.

Distribuzione annuale PMV App. Nord Contr Integrato



Distribuzione annuale PMV APP. Sud Contr Integrato





B. SERRA BIOCLIMATICA PER IL COMPLESSO DEL MAXXI A ROMA

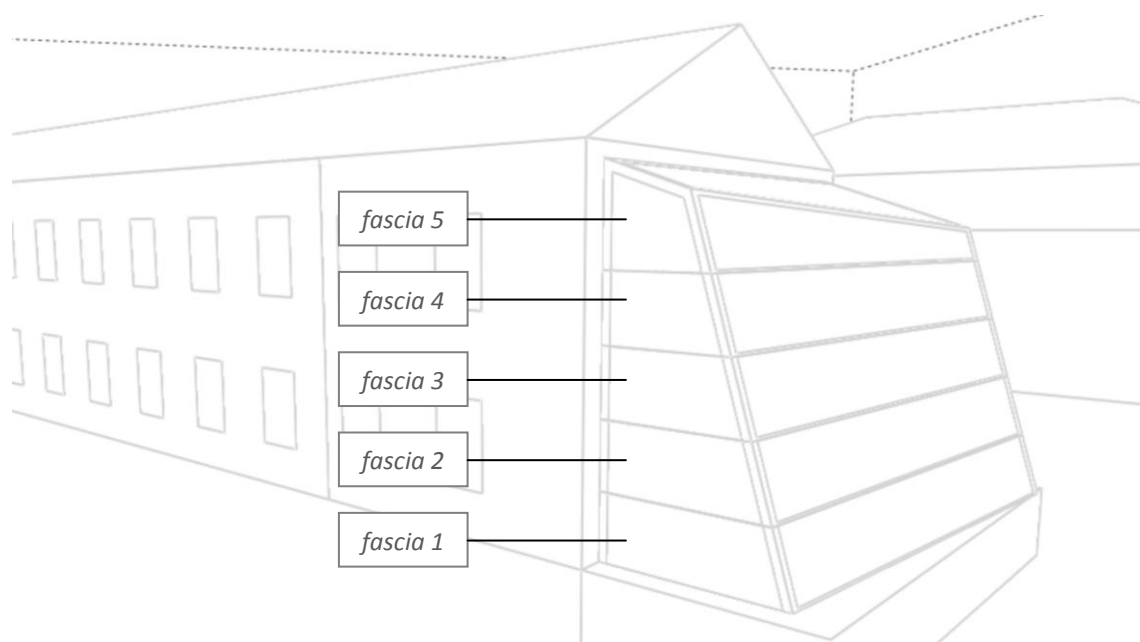


Anno	2009
Località	Roma - Via Guido Reni
Tipologia	Museo
Progetto	AeV architetti
Analisi/simulazioni	Marco Cimillo

Il progetto prevedeva la ristrutturazione di un edificio precedentemente ad uso militare che avrebbe ospitato funzioni aggiuntive per il complesso del Museo dell'Arte del XXI secolo. Annessa a tale edificio era da realizzare una serra bioclimatica della quale sono state valutate le prestazioni attraverso una serie di simulazioni dinamiche e di fluidodinamica computazionale. Nel seguito sono riassunti i principali risultati relativi alle analisi, finalizzate soprattutto alla progettazione dell'involucro esterno. Attraverso le simulazioni, studiando l'incidenza reale della radiazione solare in base all'esposizione ed alle ostruzioni circostanti è stata definita una configurazione ottimizzata nel rapporto fra guadagni e dispersioni termiche, con componenti vetrati differenziati in base alla posizione sulla facciata. Inoltre, come meglio descritto nelle pagine seguenti, è stata individuata la posizione più conveniente per le aperture da utilizzare per la ventilazione naturale estiva.

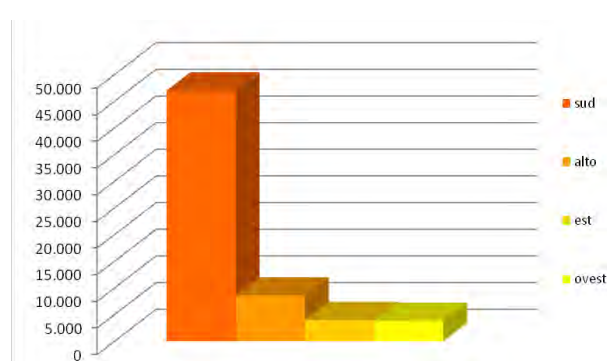
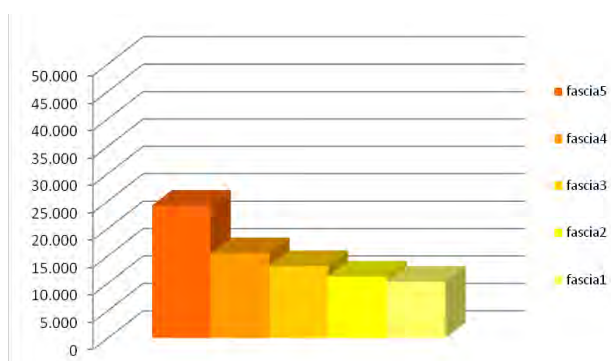
Stazione Meteo: **Roma Urbe** 41,95° N, 12,50° E - 24 m s.l.m

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Tmax (°C)	12	14	16	19	24	28	31	31	28	23	17	13
Tmed (°C)	7	8,5	10,5	13	17,5	21	24	24	21	16,5	11,5	8
Tmin (°C)	2	3	5	7	11	14	17	17	14	10	6	3
U.R. (%)	79	75	72	72	72	70	68	69	71	75	79	80
Vel. Vento (m/s)	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	2,6	2,6
Rad. Glob. (W/mq/gg)	1.670	2.290	3.660	4.980	6.010	6.610	6.630	5.850	4.510	3.060	1.930	1.470



RADIAZIONE INCIDENTE (ottobre-marzo)

	<i>est</i>	<i>ovest</i>	<i>sud</i>	<i>alto</i>	<i>totale</i>	<i>% su tot</i>
<i>fascia 5</i>	813	536	9.188	8.594	19.131	30%
<i>fascia 4</i>	754	686	12.804		14.244	22%
<i>fascia 3</i>	792	799	10.119		11.710	18%
<i>fascia 2</i>	779	877	7.963		9.619	15%
<i>fascia 1</i>	804	915	6.917		8.636	14%
<i>totale</i>	3.942	3.813	46.992	8.594	63.340	
<i>% su tot</i>	6%	6%	74%	14%		



radiazione solare incidente sulle superfici vetrate della serra (KWh, periodo ottobre-marzo)

VETRI

	A	B
tipo	doppio	doppio low-e
U	2,537	1,493
shgc	0,812	0,745

IPOTESI INIZIALE

	<i>est</i>	<i>ovest</i>	<i>sud</i>	<i>alto</i>
<i>fascia 5</i>	A	A	A	A
<i>fascia 4</i>	A	A	A	
<i>fascia 3</i>	A	A	A	
<i>fascia 2</i>	A	A	A	
<i>fascia 1</i>	A	A	A	

RADIAZIONE TRASMESSA (ottobre-marzo, vetro A)

	<i>est</i>	<i>ovest</i>	<i>sud</i>	<i>alto</i>	<i>totale</i>	<i>% su tot</i>
<i>fascia 5</i>	660	435	7.461	6.978	15.534	30%
<i>fascia 4</i>	612	557	10.397		11.566	22%
<i>fascia 3</i>	643	649	8.217		9.509	18%
<i>fascia 2</i>	633	712	6.466		7.811	15%
<i>fascia 1</i>	653	743	5.616		7.013	14%
totale	3.201	3.096	38.157	6.978	51.432	100%
<i>% su tot</i>	6%	6%	74%	14%		

DISPERSIONI TERMICHE ATTRAVERSO L'INVOLUCRO (W/K, vetro A)

	<i>est</i>	<i>ovest</i>	<i>sud</i>	<i>alto</i>	<i>totale</i>	<i>% su tot</i>
<i>fascia 5</i>	26	16	66	164	271	31%
<i>fascia 4</i>	33	18	92		143	16%
<i>fascia 3</i>	36	22	92		150	17%
<i>fascia 2</i>	40	26	92		158	18%
<i>fascia 1</i>	44	29	92		165	19%
totale	178	110	435	164	887	100%
<i>% su tot</i>	20%	12%	49%	18%		

MODIFICA VETRI

	<i>est</i>	<i>ovest</i>	<i>sud</i>	<i>alto</i>
<i>fascia 5</i>	B	B	A	A
<i>fascia 4</i>	B	B	A	
<i>fascia 3</i>	B	B	A	
<i>fascia 2</i>	B	B	B	
<i>fascia 1</i>	B	B	B	

RADIAZIONE TRASMESSA (ottobre-marzo, vetri modificati)

	<i>est</i>	<i>ovest</i>	<i>sud</i>	<i>alto</i>	<i>totale</i>	<i>% su tot</i>
<i>fascia 5</i>	606	399	7.461	6.978	15.444	31%
<i>fascia 4</i>	562	511	10.397		11.470	23%
<i>fascia 3</i>	590	595	8.217		9.402	19%
<i>fascia 2</i>	580	653	5.932		7.166	14%
<i>fascia 1</i>	599	682	5.153		6.434	13%
<i>totale</i>	2.937	2.841	37.160	6.978	49.916	
<i>% su tot</i>	6%	6%	74%	14%		

DISPERSIONI TERMICHE ATTRAVERSO L'INVOLUCRO (W/K, vetri modificati)

	<i>est</i>	<i>ovest</i>	<i>sud</i>	<i>alto</i>	<i>totale</i>	<i>% su tot</i>
<i>fascia 5</i>	15	9	66	164	254	37%
<i>fascia 4</i>	19	11	92		122	18%
<i>fascia 3</i>	21	13	92		126	18%
<i>fascia 2</i>	23	15	54		93	13%
<i>fascia 1</i>	26	17	54		97	14%
<i>totale</i>	105	65	359	164	692	
<i>% su tot</i>	15%	9%	52%	24%		

Variazione su ipotesi iniziale

Radiazione trasmessa: - 3%

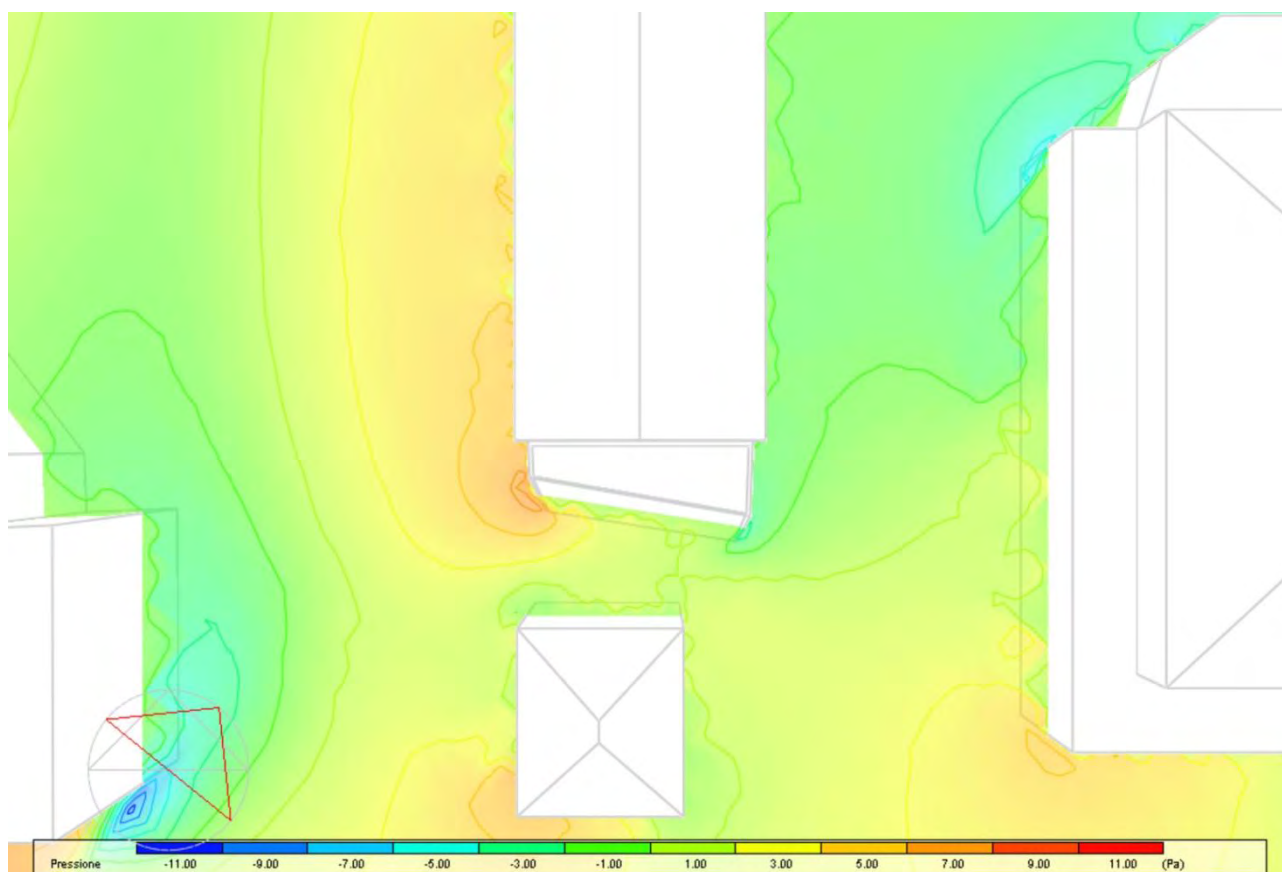
Dispersioni per trasmissione: -22%

Infine sono stati simulati i campi di pressione e velocità dell'aria intorno all'edificio nella situazione estiva al fine di ottenere informazioni utili al posizionamento delle aperture esterne della serra naturale ed alla stima dell'entità dei ricambi d'aria ottenibili attraverso la ventilazione naturale del volume.

Le condizioni del vento rappresentano la situazione media del periodo, con una velocità di 4 m/s all'altezza di 10 m (ridotta in base al coefficiente di rugosità del territorio) e una direzione di provenienza S-SO.

La posizione più vantaggiosa per le aperture è sulle due opposte facciate laterali, fra le quali risulta la massima differenza di pressione. La loro collocazione rispetto allo spazio interno le rende inoltre adatte ad un'efficiente ventilazione dell'intero volume. Con la completa apertura delle facciate è stata stimato, in maniera prudenziale, un ricambio d'aria pari a 1,5 vol/min.

L'immagine seguente illustra il risultato delle simulazioni.



campo di pressione a 5,5 mt da terra

C. RESIDENZE A BIOCLIMATICHE A FIUMICINO



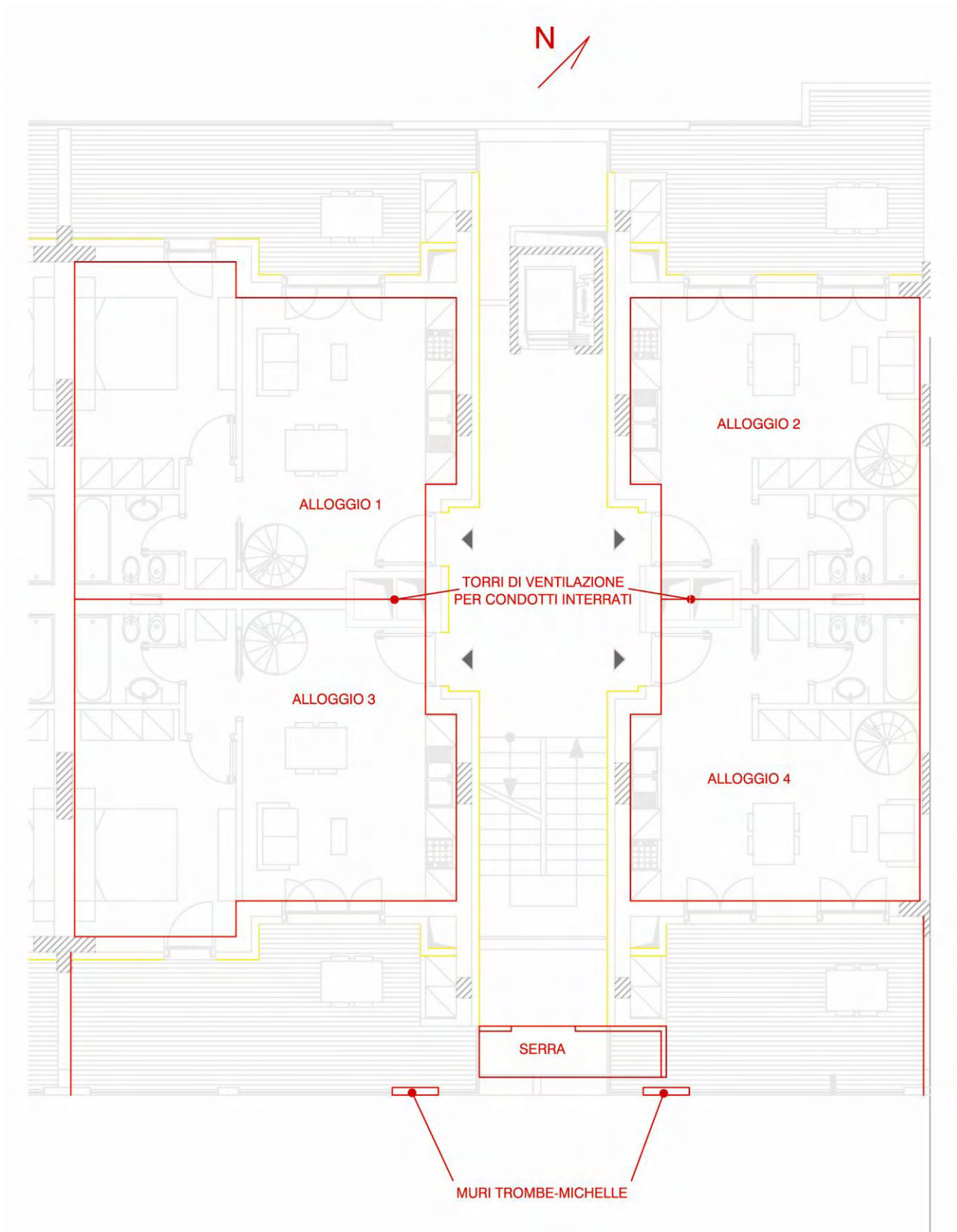
Anno	2009
Località	Fiumicino (RM)
Tipologia	Residenziale
Progetto	Architettonico: Studio NIRA srl, Stefania Caporio Bioclimatica: Battisti Tucci Architetti Associati
Analisi/simulazioni	Marco Cimillo

L'edificio fa parte del Programma integrato per la riqualificazione urbanistica, edilizia ed ambientale "La Sorgente", in località Muracciole.

In questo caso le simulazioni sono state eseguite su una porzione limitata dell'edificio allo scopo di ottenere delle indicazioni di massima sul comportamento energetico dell'edificio nel suo complesso e di alcuni sistemi passivi ipotizzati. In questo caso particolare attenzione è stata dedicata al sistema di ventilazione comprensivo di condotti interrati per il pretrattamento dell'aria di rinnovo degli alloggi. Tali dispositivi, ad una prima analisi erano infatti risultati i più efficaci e convenienti nel rapporto costo-benefici. In una fase successiva, i cui risultati sono qui sintetizzati, si sono analizzate le prestazioni dell'edificio e dei condotti parametrizzandole alla portata d'aria di progetto. L'obiettivo era quello di garantire una qualità dell'aria anche superiore agli standard mantenendo comunque bassi i consumi energetici.

Stazione Meteo: **Roma Fiumicino** 41° 47' N, 12° 13' E - 3 m s.l.m

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Tmax (°C)	13	14	15	18	22	26	29	29	26	22	17	14
Tmed (°C)	8,5	9	10,5	13	16,5	21	23,5	23,5	21	16,5	12,5	9,5
Tmin (°C)	4	4	6	8	12	16	18	18	16	12	8	5
U.R. (%)	75	75	75	75	75	73	72	73	75	76	77	77
Vel. Vento (m/s)	2,6	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	2,6	2,6	2,6
Rad. Glob. (W/mq/gg)	1.670	2.290	3.660	4.980	6.010	6.610	6.630	5.850	4.510	3.060	1.930	1.470



suddivisione in zone termiche e dei sistemi passivi della porzione considerata

TRASMITTANZE TERMICHE DEGLI ELEMENTI DI INVOLUCRO

Pareti esterne (con Poroton e EPS 6 cm): 0,379 (W/m²K)

Parete Alloggi-Scale: 0,38

Finestre a Nord

Solo vetro (vetrocamera bassoemissivo con krypton 6-13-6 mm) : 1,41

Con infisso (Schuco AWS75.SI, infisso 100x230 cm) 1,58

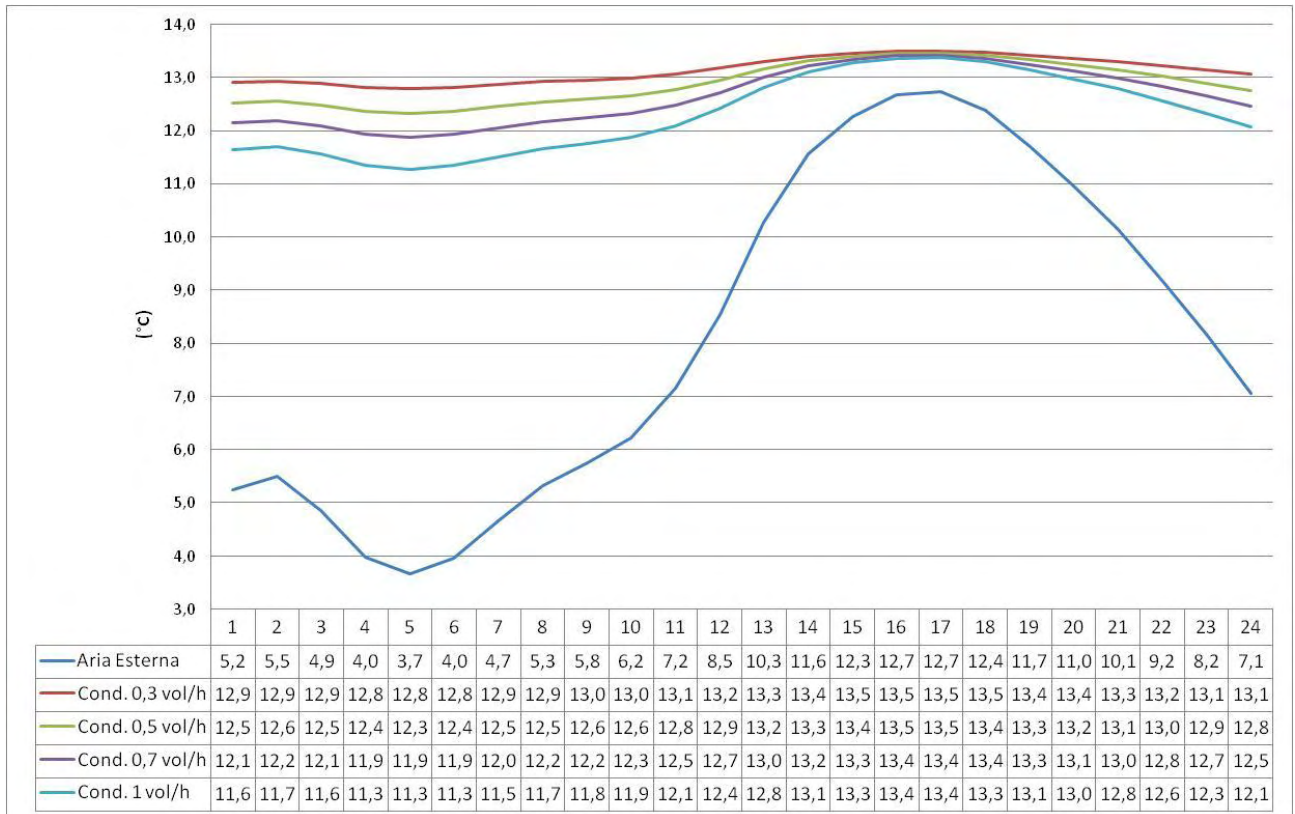
Finestre a Sud

Solo vetro (vetrocamera bassoemissivo con aria 6-13-6 mm): 1,78

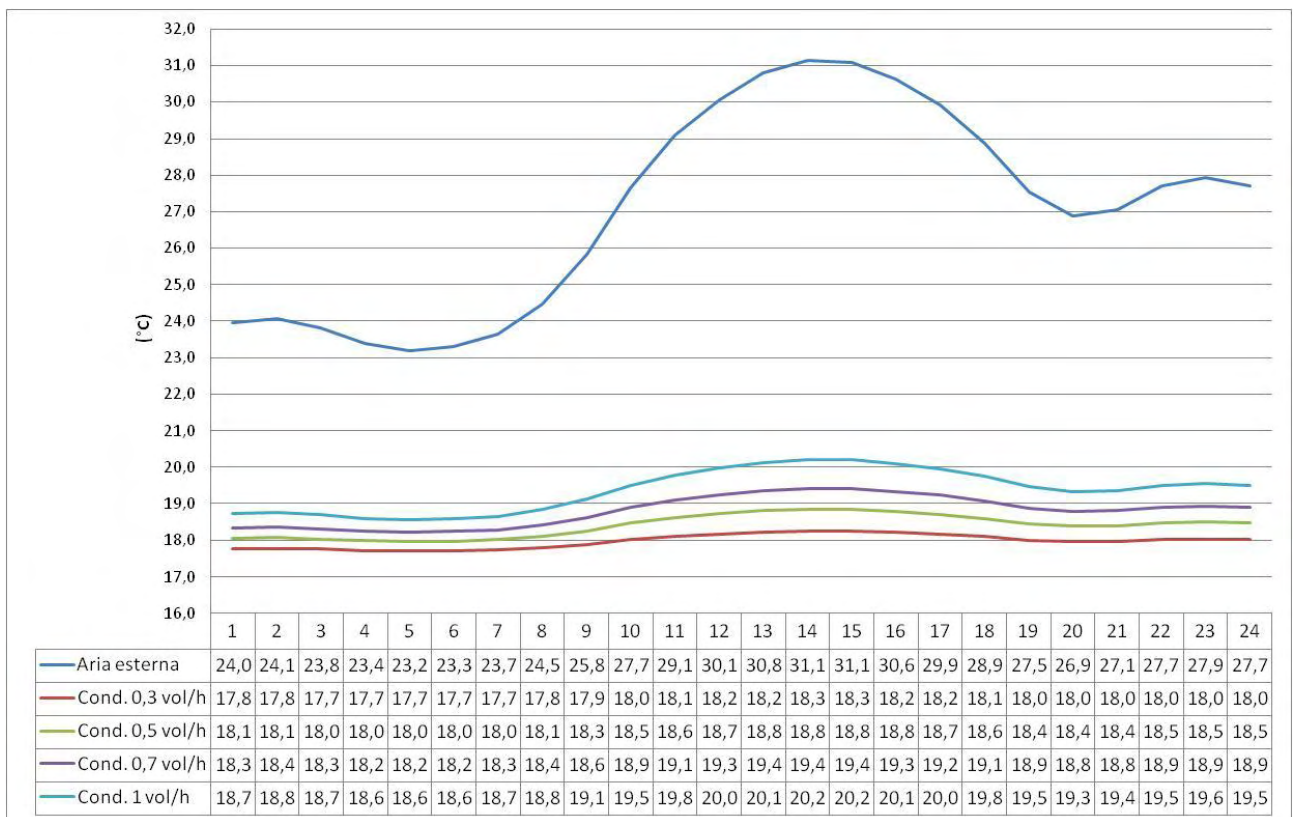
Con infisso (Schuco AWS75.SI, infisso 100x230 cm) : 1,87

fabbisogni specifici annui

Portata aria di rinnovo (vol/h)	Fabbisogno termico invernale (kWh/m ²)	Fabbisogno termico estivo (kWh/m ²)	Fabbisogno termico totale (kWh/m ²)
0,3	11,01	12,11	23,12
0,5	15,95	7,53	23,48
0,7	19,36	4,02	23,38
1	26,50	1,18	27,68



temperature dell'aria esterna e in uscita dai condotti il 1 febbraio



temperature dell'aria esterna e in uscita dai condotti il 15 agosto

D. CONCORSO PER IL RECUPERO DI UN EDIFICIO INDUSTRIALE IN TOSCANA



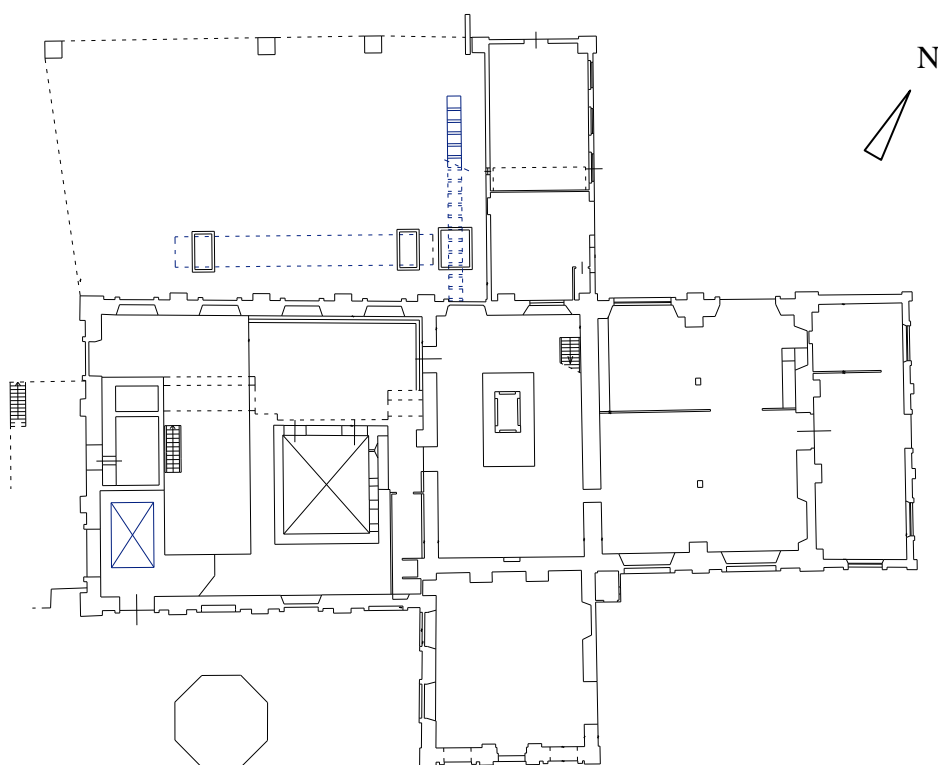
Anno	2010
Località	San Giovanni Val d'Arno (AR)
Tipologia	Edificio per uffici
Progetto	1AX Architetti Associati, Carlo Vigevano
Aspetti energetici, Analisi/simulazioni	Marco Cimillo

Il concorso riguardava un ex bricchettificio da trasformare nella sede di una società immobiliare, con un'attenzione particolare agli aspetti della sostenibilità ambientale ed efficienza energetica. La proposta presentata prevedeva l'utilizzo del principio dell'isolamento dinamico durante il periodo di riscaldamento e della ventilazione notturna durante l'estate. Quest'ultima soluzione era dettata dalla presenza contemporanea di un involucro massivo, di una buona escursione termica giornaliera e di una favorevole distribuzione temporale dei carichi termici. L'isolamento dinamico nasceva invece dall'idea di realizzare un secondo involucro *mobile* che separasse ed isolasse gli uffici dalle masse murarie in inverno, creando una sorta di intercapedine-cuscinetto attraverso la quale far passare l'aria di rinnovo. Lo stesso principio è stato poi trasferito anche all'auditorium annesso, per il cui involucro (da realizzare ex novo) è stato immaginato l'utilizzo di un *breathing wall*, una muratura permeabile attraverso la quale introdurre l'aria di rinnovo recuperando parte delle dispersioni termiche. Sia la ventilazione notturna che il principio dell'isolamento dinamico, pur avvalendosi (non sempre) di sistemi di ventilazione meccanica, sono qui considerati passivi, in quanto non implicano la produzione di calore o l'uso di condizionatori, ma sfruttano le risorse climatiche e strutturali attraverso una gestione mirata dell'edificio.

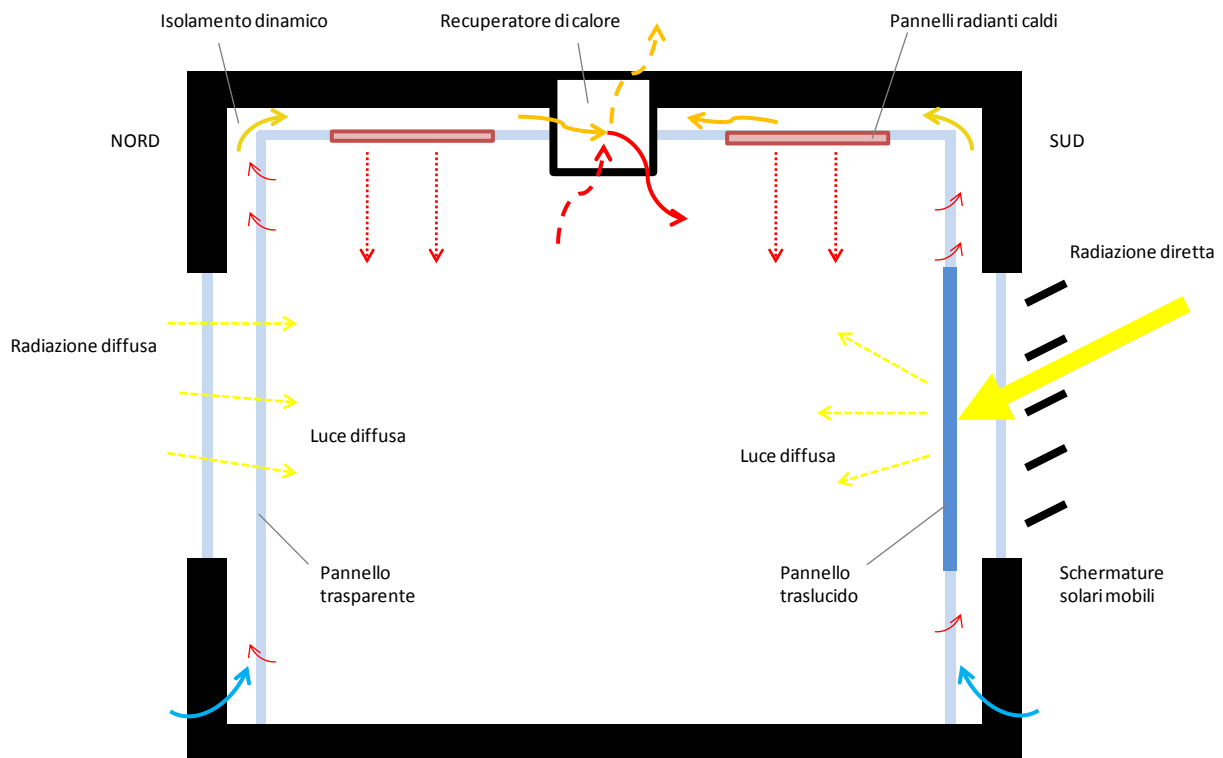
Di seguito sono riassunte le caratteristiche fondamentali del sito e dell'edificio, gli schemi di funzionamento delle soluzioni proposte ed i principali risultati delle simulazioni eseguite.

Stazione Meteo: **Arezzo** 43, 47° N, 11,85° E - 249 m s.l.m

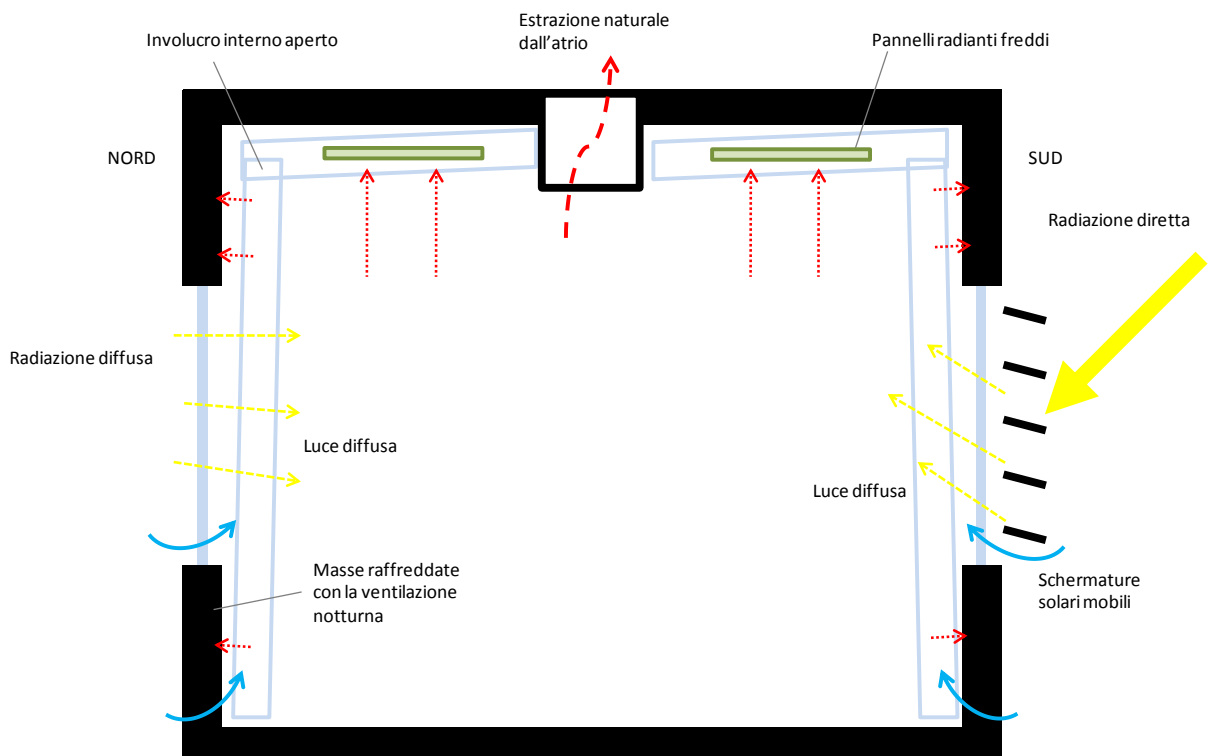
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Tmax (°C)	9	10	13	17	22	26	30	29	25	20	13	9
Tmed (°C)	4,5	5,5	7,5	11	15	18,5	22	21,5	18	13,5	8,5	5
Tmin (°C)	0	1	2	5	8	11	14	14	11	7	4	1
U.R. (%)	78	74	69	69	70	68	67	66	70	76	78	79
Vel. Vento (m/s)	2,6	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	2,6	2,6	4,4	4,4
Rad. Glob. (W/mq/gg)	1.440	2.110	3.280	4.690	5.540	6.300	6.510	5.890	4.330	2.800	1.630	1.170



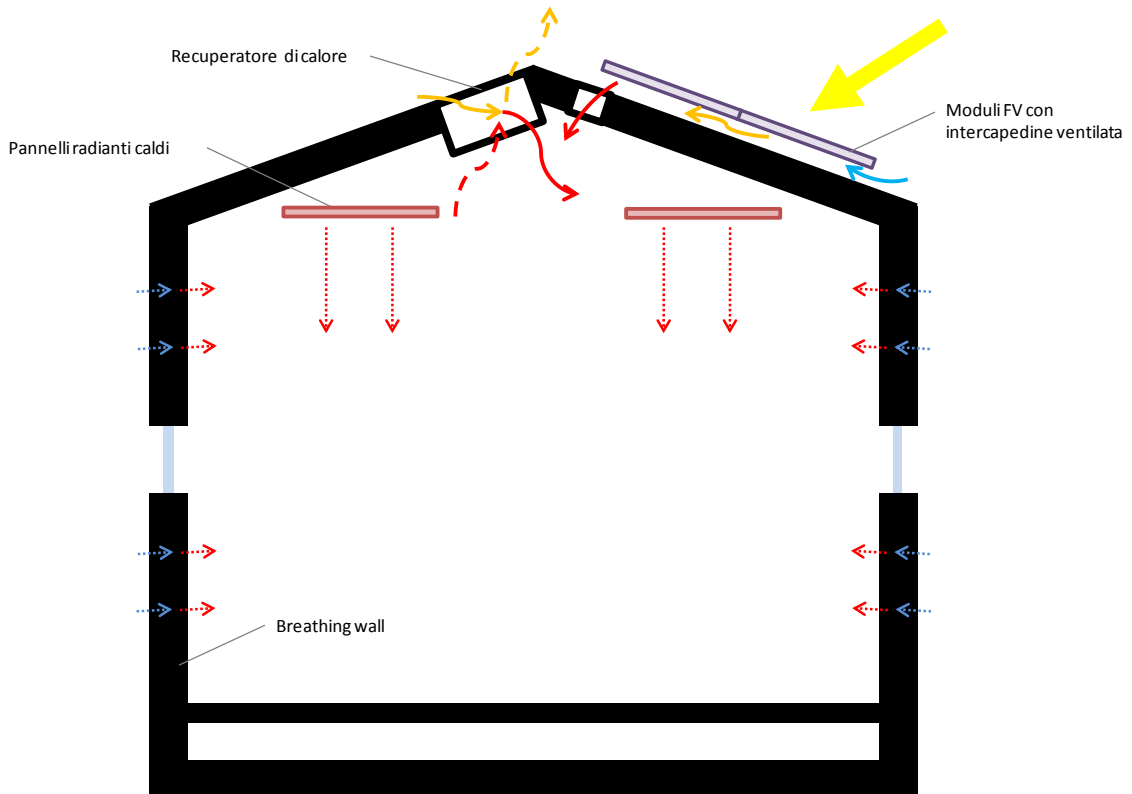
Prospetto e pianta dell'edificio dismesso



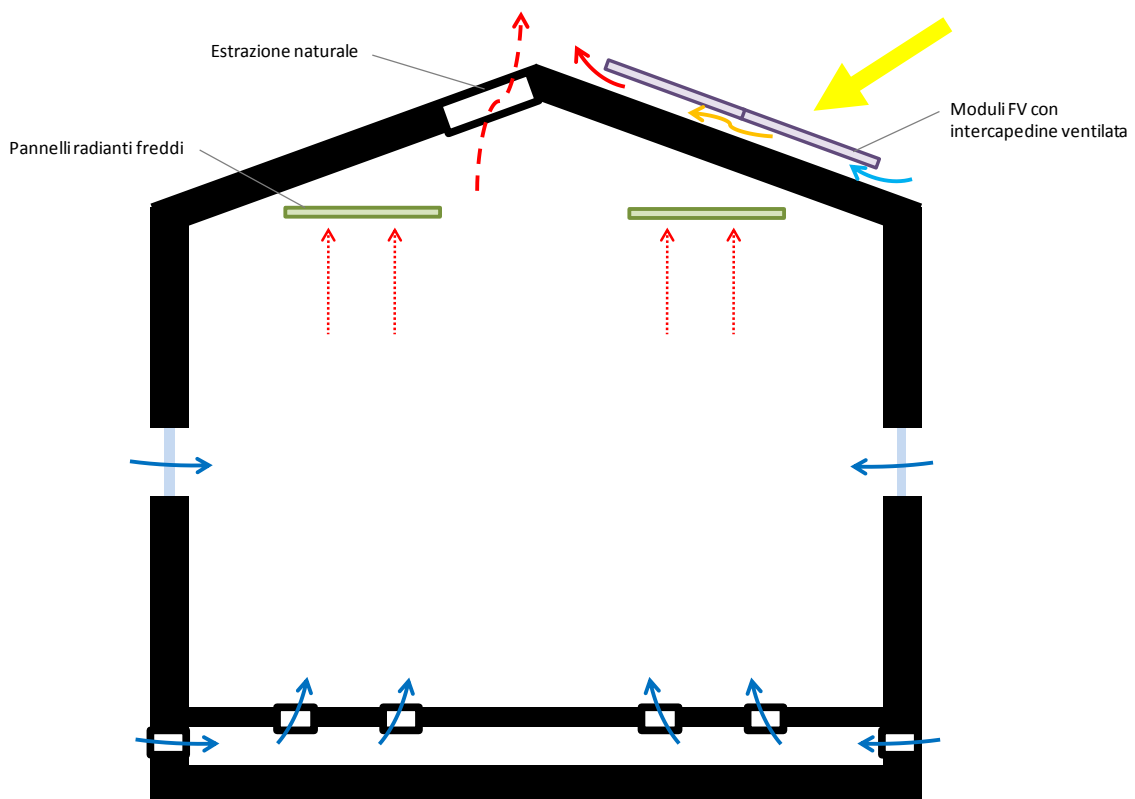
UFFICI - CONFIGURAZIONE INVERNALE



UFFICI - CONFIGURAZIONE ESTIVA

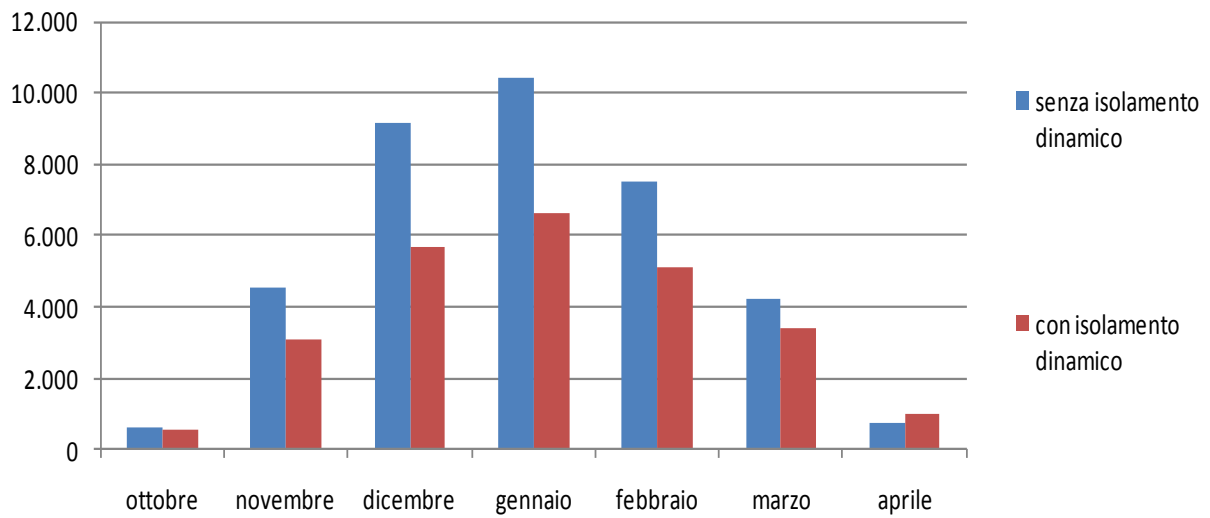


AUDITORIUM - CONFIGURAZIONE INVERNALE

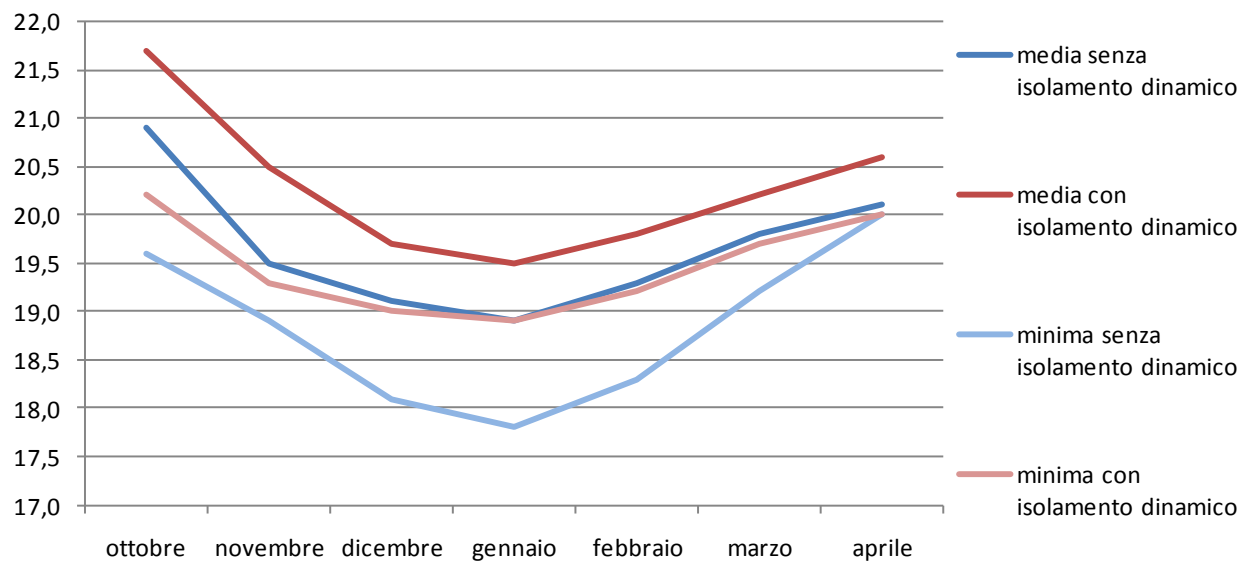


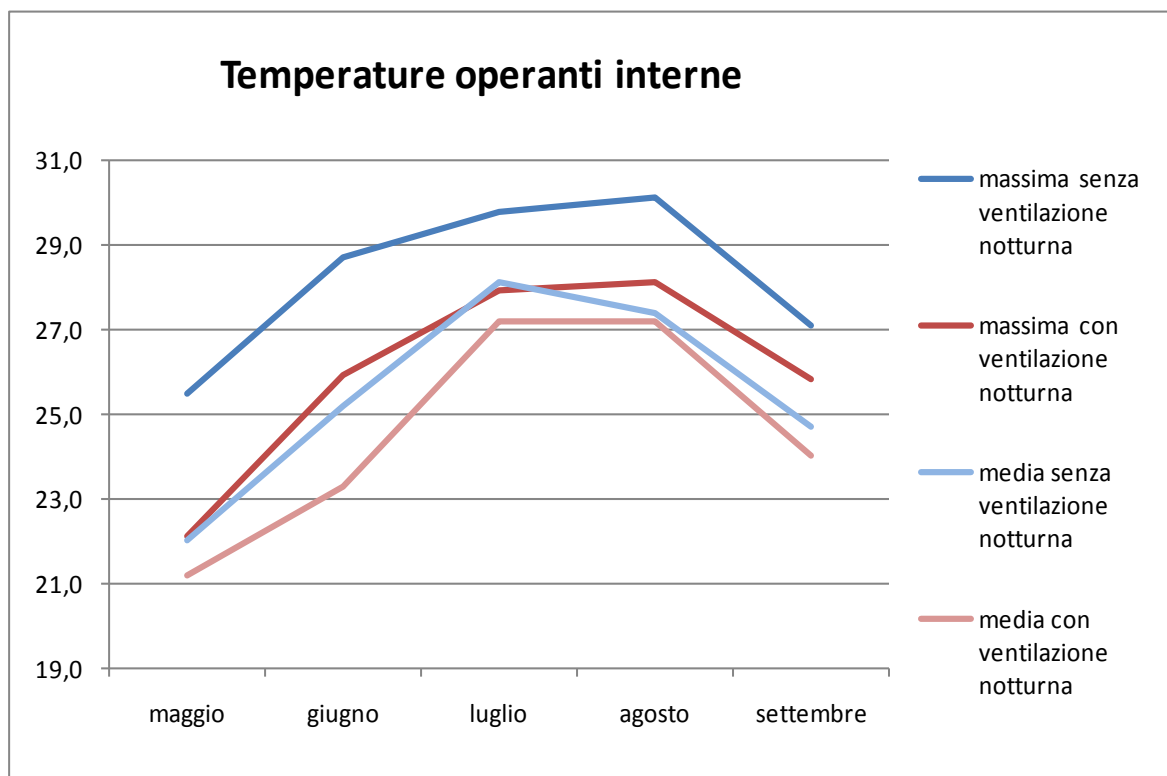
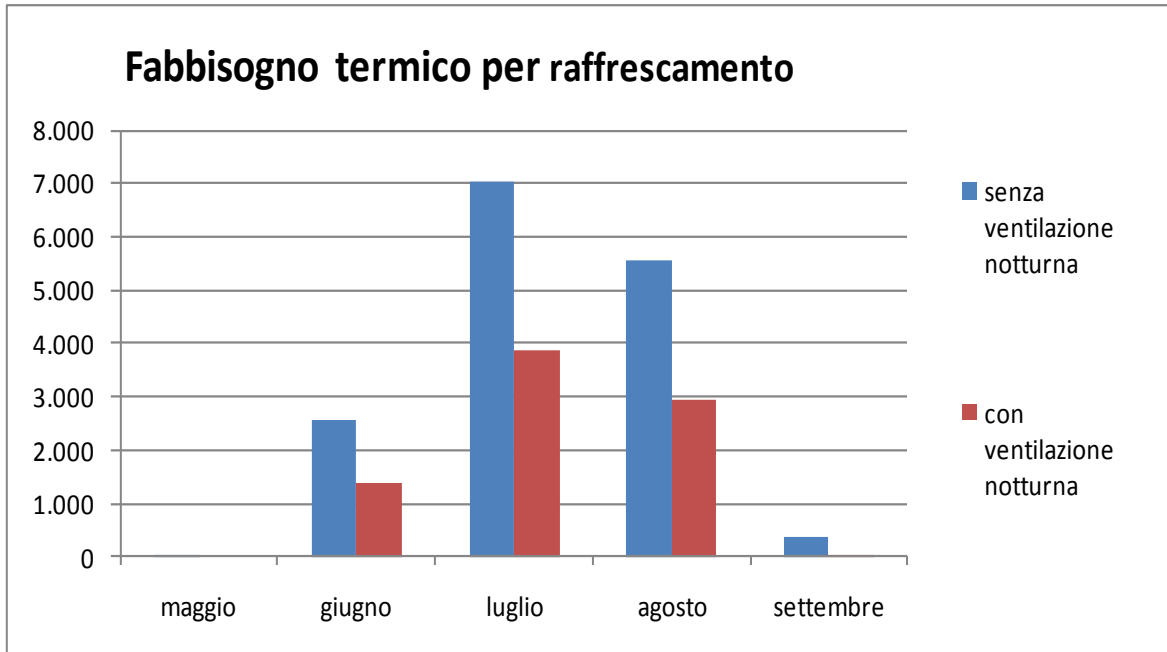
AUDITORIUM - CONFIGURAZIONE ESTIVA

Fabbisogno termico per riscaldamento



Temperature operanti interne





E. RECUPERO DI UN COMPLESSO RESIDENZIALE STORICO IN PUGLIA



Anno	2010
Località	Salve (LE)
Progetto	Architettonico: Salvatore Dierna Tecnologia/impianti/energia/bioclimatica: Franco Cipriani, Fabrizio Tucci, Valeria Cecafosso, Marco Cimillo
Analisi/simulazioni	Marco Cimillo

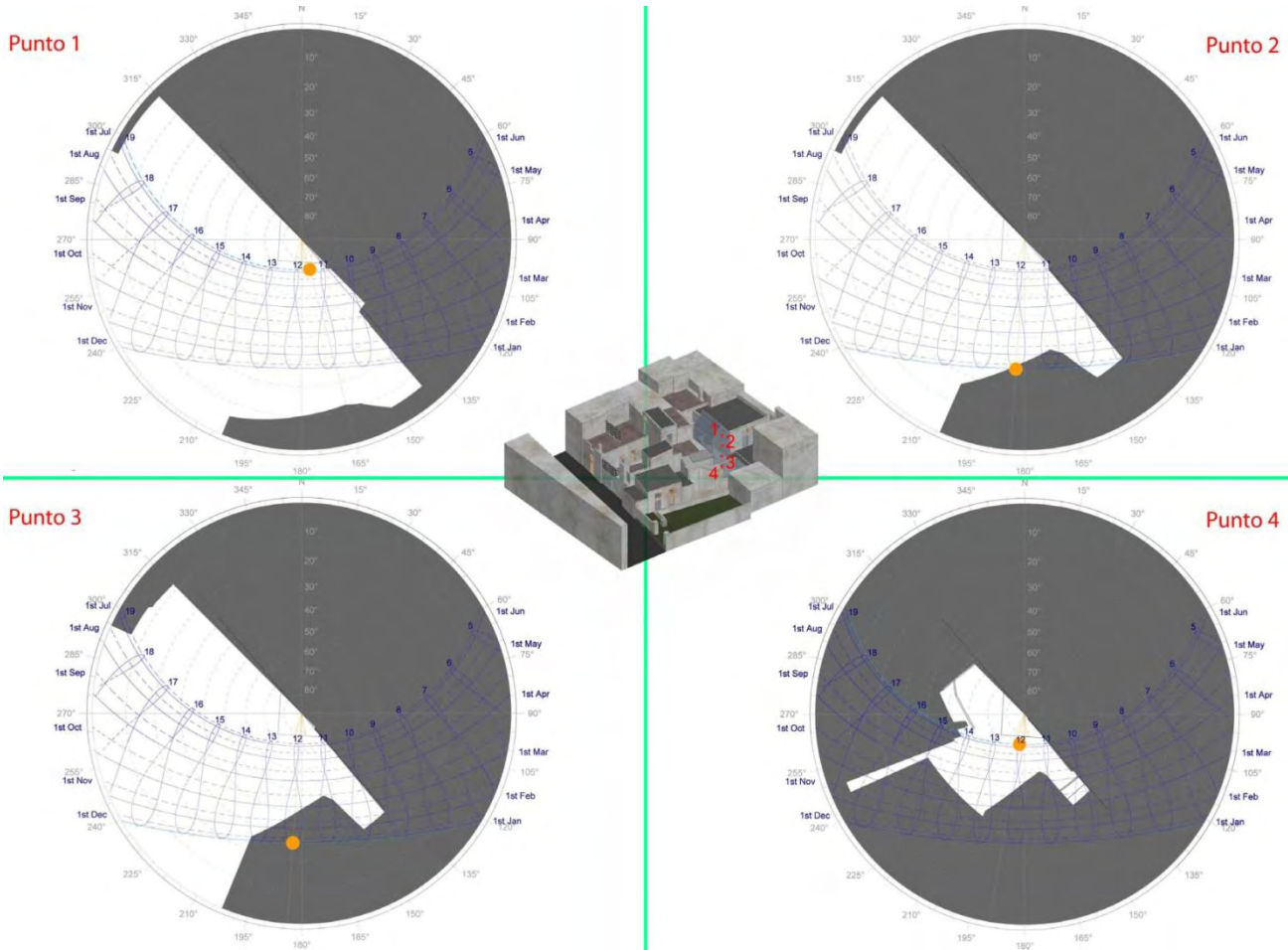
Il progetto, in via di realizzazione, prevede il recupero di un complesso di edilizia storica minore di circa 165 mq, che verrà trasformato in un insieme di sei unità semi-indipendenti e messe in relazione da un sistema di spazi e servizi comuni.

Il complesso comprende degli spazi aperti più delle cisterne in disuso ed uno spazio ipogeo scavati nella roccia. L'insieme di tali elementi è stato incluso nel sistema di pretrattamento naturale dell'aria che, nello spirito più ampio del progetto di recupero delle preesistenze, se ne avvale anche per gli aspetti tecnologici. In generale tutte le strategie passive e impiantistiche sono state pensate in relazione alle condizioni climatiche ed ambientali locali e durante l'intero processo progettuale ci si è avvalsi di strumenti di analisi e simulazione per verificare la funzionalità delle soluzioni previste e valutarne le prestazioni.

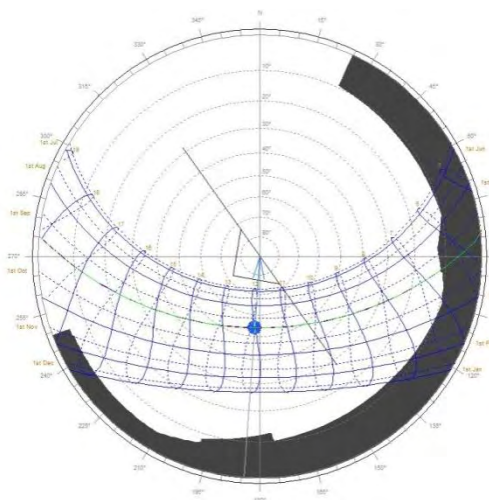
Di seguito vengono riassunte le principali caratteristiche del sito e del progetto ed i principali risultati degli studi condotti.

Stazione Meteo: **Santa Maria di Leuca** 39,82° N, 18.85° E - 112 m s.l.m

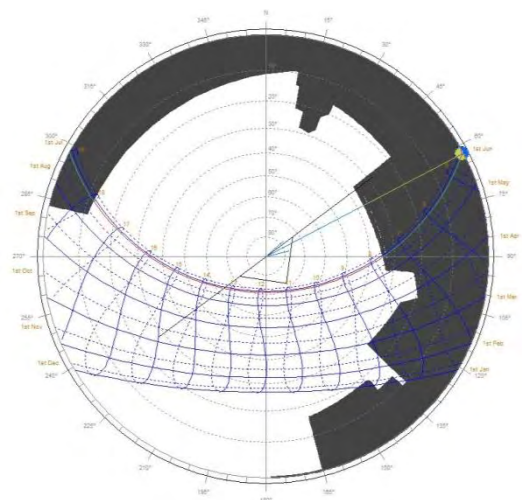
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Tmax (°C)	10	10,5	11,5	14	18	22	24,5	25,5	22	18,5	14,5	11,5
Tmed (°C)	12	13	14	17	21	25	28	29	25	21	17	14
Tmin (°C)	8	8	9	11	15	19	21	22	19	16	12	9
U.R. (%)	78	77	78	78	76	74	69	72	75	79	79	79
Vel. Vento (m/s)	4,4	4,4	4,4	4,4	2,6	2,6	2,6	2,6	4,4	4,4	4,4	4,4
Rad. Glob. (W/mq/gg)	1.896	2.490	3.903	5.403	6.462	7.127	7.129	6.505	4.950	3.487	2.161	1.645



maschere di ombreggiamento solare in alcuni punti significativi degli involucri della serra

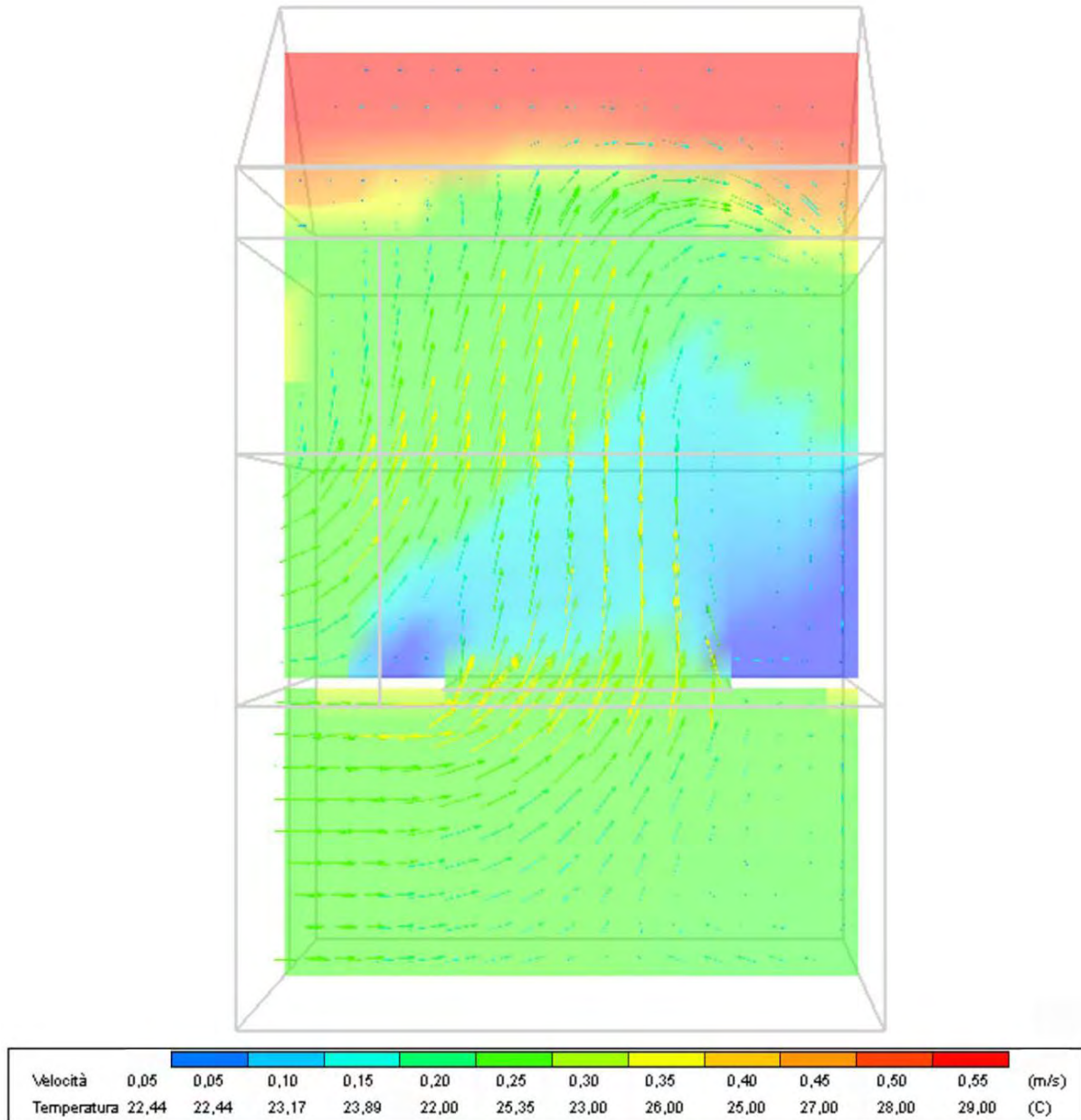


maschere di ombreggiamento solare sui moduli fotovoltaici

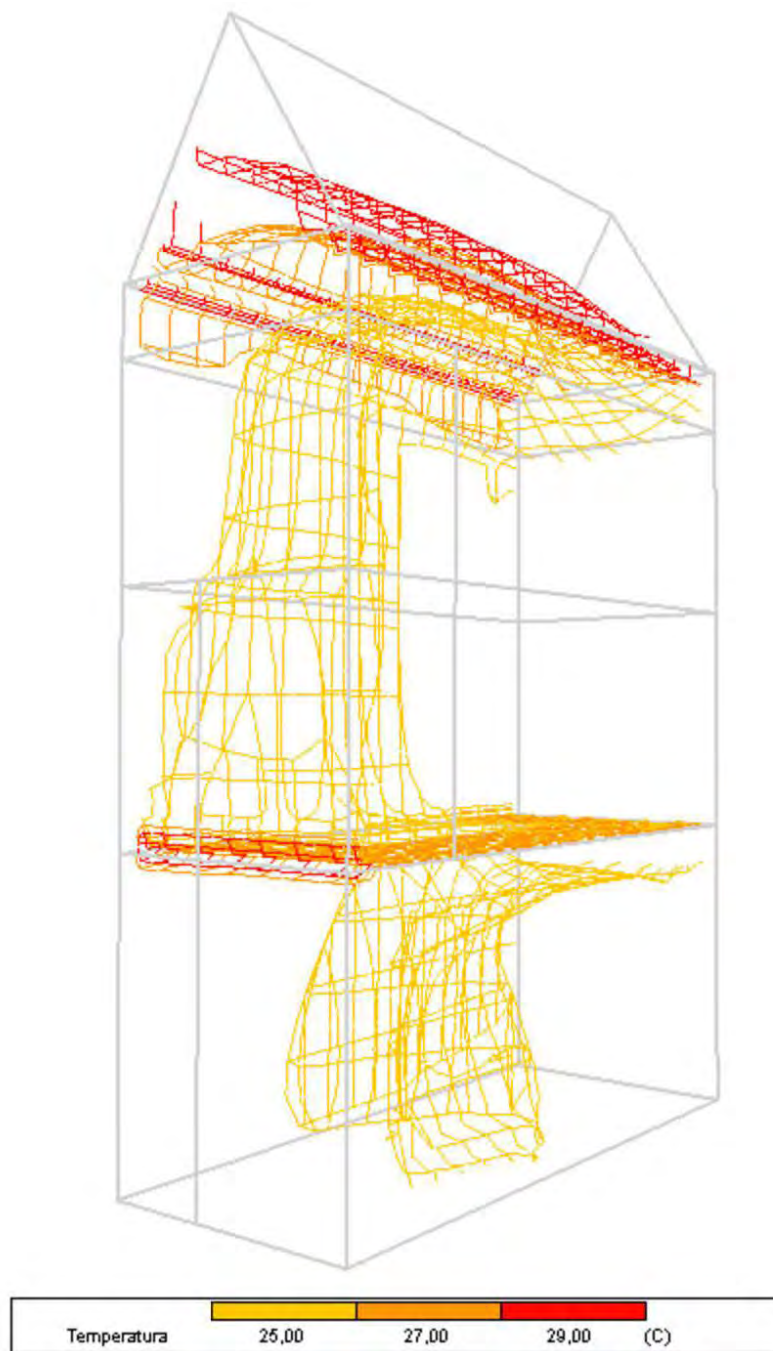


maschere di ombreggiamento solare sui pannelli solari termici

La serra bioclimatica, progettata per il riscaldamento solare in inverno, è in parte schermabile ed apribile per evitare un indesiderato surriscaldamento nel periodo estivo. Anche tali soluzioni sono state verificate tramite studi solari e simulazioni di fluidodinamica computazionale.

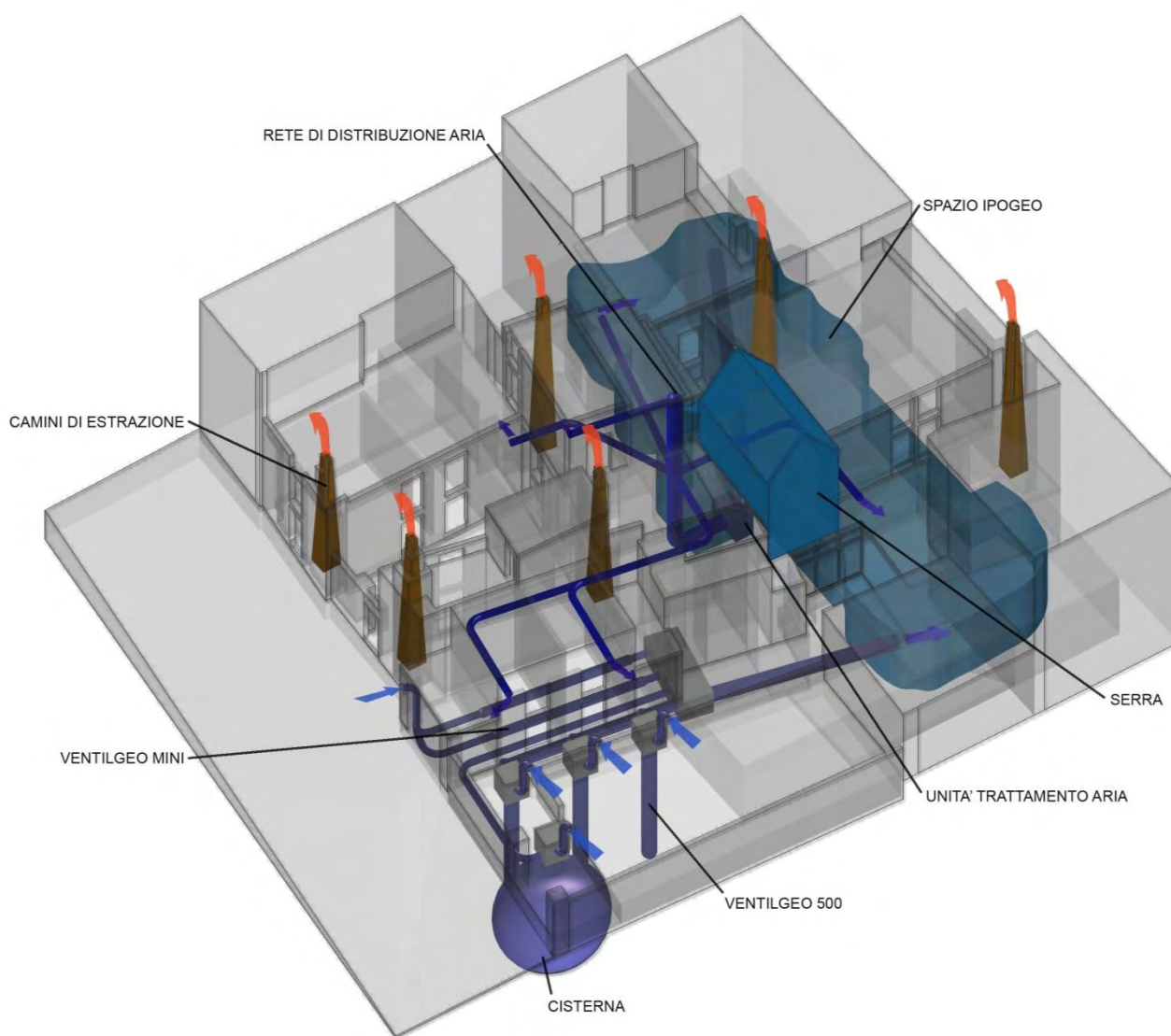


la sezione longitudinale sul volume principale della serra illustra tramite rappresentazione vettoriale direzione e velocità del flusso d'aria nello spazio. I colori si riferiscono invece alla distribuzione della temperatura dell'aria. L'istante fotografato rappresenta una situazione estiva, con l'involucro parzialmente aperto e il vento proveniente da sud-ovest (da sinistra nell'immagine). L'effetto combinato della pressione del vento e dei movimenti convettivi generati dal contatto dell'aria con le superfici interne producono un flusso in ingresso prevalentemente dalle aperture in basso del lato sopravvento ed in uscita da quelle più alte del versante opposto. Il movimento d'aria interessa l'intero volume, con un buon ricambio in tutte le zone dello stesso



i contorni tridimensionali evidenziano l'aria calda tenda a stratificarsi nelle parti più alte del volume. Tale fenomeno è positivo per il comfort ambientale all'interno della serra perché le zone più calde vengono a trovarsi lontano da quelle occupate che si mantengono a temperature più fresche.

Uno degli aspetti più caratteristici del progetto è quello che riguarda il sistema ventilazione. Il percorso dell'aria parte in maniera parallela da una serie di condotti interrati, dalle cisterne e da elementi industriali verticali e coassiali progettati per funzionare secondo gli stessi principi dei condotti interrati ma in uno spazio più ridotto. I tre percorsi confluiscono quindi nello spazio ipogeo (dove avviene un ulteriore scambio termico con le pareti di roccia) per essere successivamente trattata attraverso il passaggio in una batteria e distribuita agli ambienti interni. Durante la stagione invernale all'aria trattata nel sistema sotterraneo viene unita quella estratta dalla serra solare. L'aria viene infine espulsa dagli ambienti tramite torri di estrazione che sfruttano nella quasi totalità dei casi i camini preesistenti.



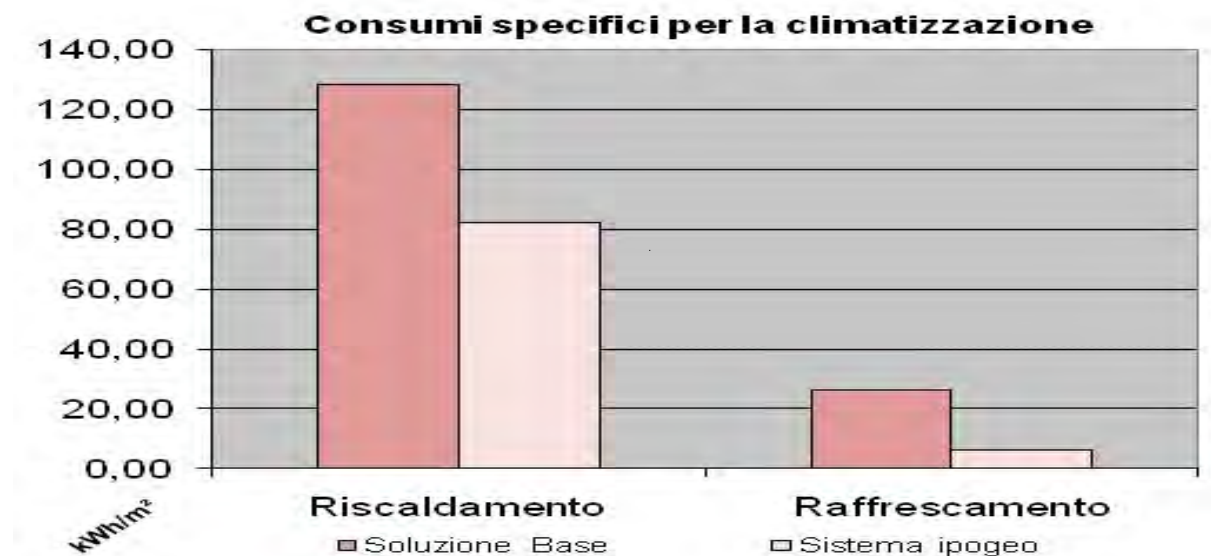
sistema ventilazione con gli elementi per il trattamento, la distribuzione e l'espulsione dell'aria

L'insieme dei sistemi di efficienza energetica adottati (condotti interrati, spazi ipogei, serra solare e torri di estrazione) incidono in maniera significativa sui fabbisogni di energia termica dell'edificio, così come sintetizzato nella tabella e nel grafico sottostanti.

L'edificio che ha un rapporto di S/V pari a 0,72 e si trova in un comune con 1.224 gradi giorno, grazie anche alla scelta di un impianto a pompa di calore ha ottenuto una certificazione energetica in classe A, con un fabbisogno di energia primaria per riscaldamento pari a 30,62 kWh/mq annui.

Fabbisogni specifici per la climatizzazione estiva e invernale (kWh/mq)

Ipotesi	Riscaldamento	Raffrescamento	Totale
Soluzione base	128,38	26,12	154,51
Con sistema ipogeo	82,29	6,10	88,39
<i>variazione</i>	-35,90%	-76,66%	-42,79%



F. HOUSING SOCIALE A FIRENZE



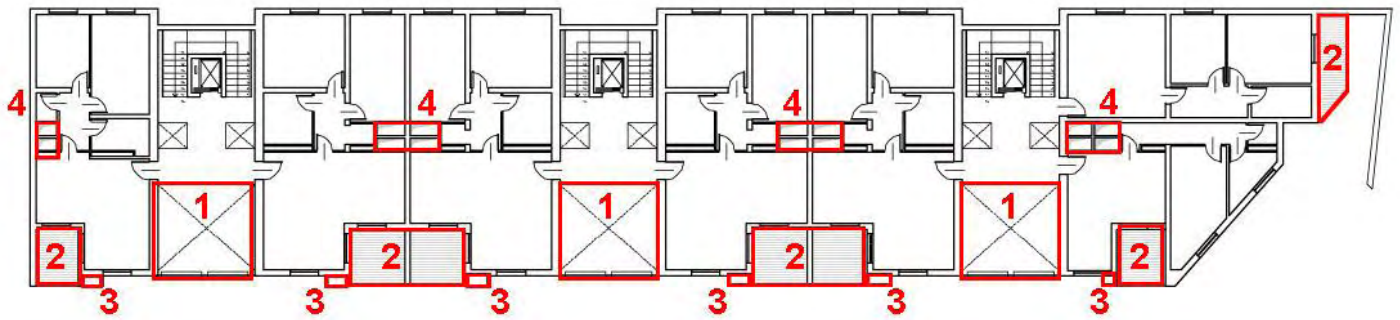
Anno	2011
Località	Firenze – Pegna
Tipologia	Residenziale
Progetto	Architettonico/Strutturale: CASA spa
	Consulenza aspetti bioclimatici: Battisti Tucci Architetti Associati
Analisi/simulazioni	Marco Cimillo

Si tratta di un intervento di edilizia sociale che prevede la realizzazione di 20 alloggi in un edificio a bassissimo consumo energetico da costruire prevalentemente in legno (strutture incluse). L'edificio si avvale di un involucro con elevato isolamento termico (trasmittanze fino al 40% inferiori a quelle massime di legge), di un insieme di sistemi solari passivi, in parte comuni all'intero edificio ed in parte dei singoli alloggi, ed un sistema di ventilazione controllata dotato di condotti interrati per il pretrattamento dell'aria di rinnovo e torri di estrazione.

Le simulazioni condotte avevano l'obiettivo di verificare e ottimizzare il funzionamento dei sistemi passivi, e più in generale delle soluzioni progettuali adottate, sia in riferimento ai fabbisogni energetici che alle condizioni di comfort interne. Nelle pagine seguenti sono riassunte le ipotesi di lavoro ed i principali risultati delle analisi.

Stazione Meteo: **Firenze Peretola** 43,80° N, 11,20° E - 3 m s.l.m

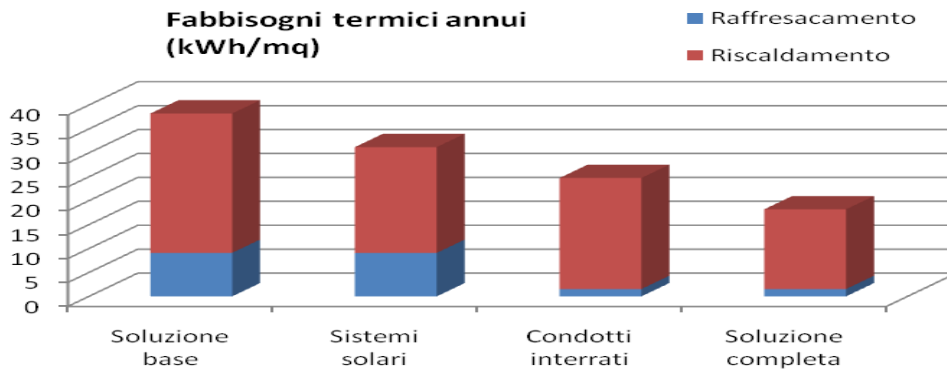
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Tmax (°C)	10	12	15	19	23	27	31	31	27	21	15	10
Tmed (°C)	5,5	7,5	10,	14,5	17	21	24	24	20,5	15,5	10,5	6
Tmin (°C)	1	3	5	8	11	15	17	17	14	10	6	2
U.R. (%)	76	7	66	68	68	68	65	66	69	73	36	38
Vel. Vento (m/s)	4,4	4,4	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	4,4	2,6	2,6
Rad. Glob. (W/mq/gg)	1.380	2.030	3.190	4.480	5.470	6.270	4.490	5.640	4.190	2.640	1.56	1.130



*piano tipo con individuazione dei principali elementi bioclimatici:
1.atrì, 2.serre, 3.muri Trombe-Michelle e 4.torri di ventilazione*

Ssono state prese in considerazione quattro situazioni:

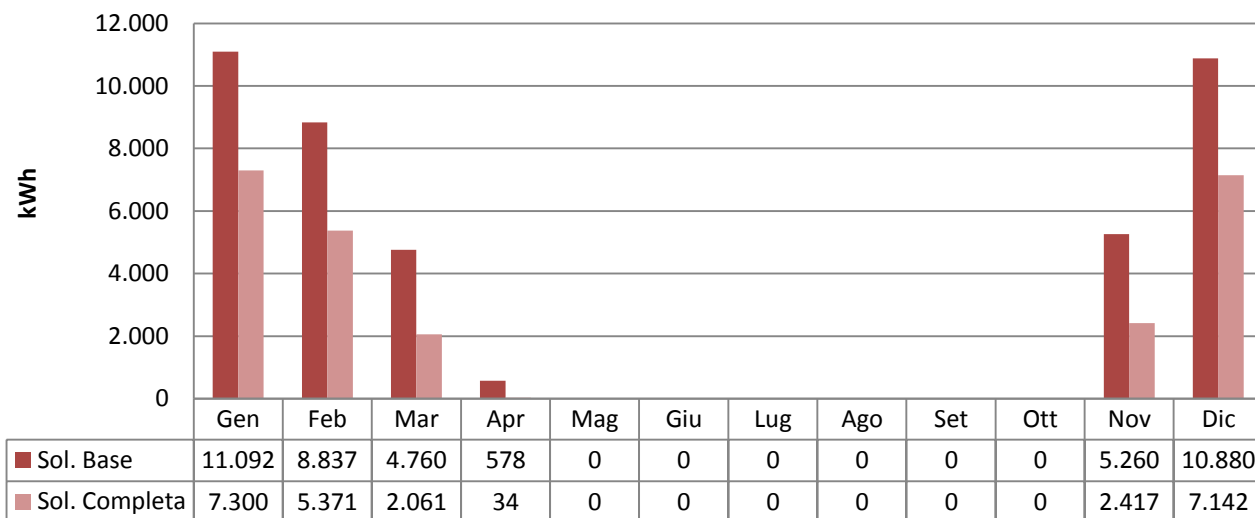
1. **Soluzione base:** rappresenta l'edificio privo dei sistemi solari passivi e dei condotti interrati.
2. **Sistemi solari:** equivalente alla soluzione 1 ma con l'aggiunta dei sistemi solari passivi.
3. **Condotti interrati:** equivalente alla soluzione 1 ma con l'aggiunta dei condotti interrati.
4. **Soluzione completa:** rappresenta lo stato di progetto, con l'edificio completo di tutti i sistemi di controllo passivo.



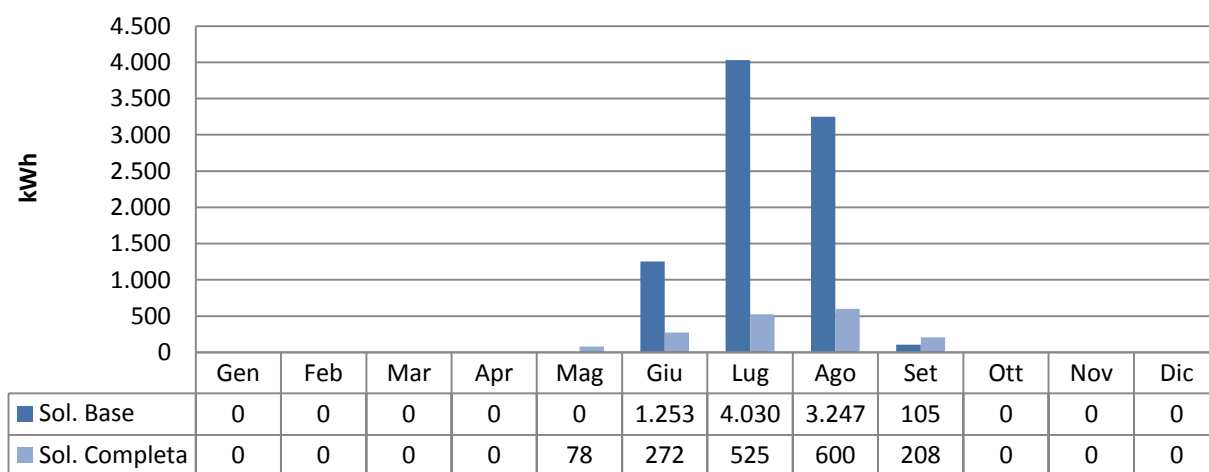
	<i>Soluzione base</i>	<i>Sistemi solari</i>	<i>Condotti interrati</i>	<i>Soluzione completa</i>
Riscaldamento	29,12	22,11	23,21	16,66
<i>variazione</i>		-24,07%	-20,30%	-42,79%
Raffrescamento	9,1	9,1	1,54	1,54
<i>variazione</i>		0,00%	-83,08%	-83,08%
Totale	38,22	31,21	24,75	18,2
<i>variazione</i>		-18,34%	-35,24%	-52,38%

Per un confronto su base mensile sono state considerate le due soluzioni più distanti, quella *base* e quella *completa*. L'andamento dei fabbisogni termici è illustrato nei due grafici sottostanti

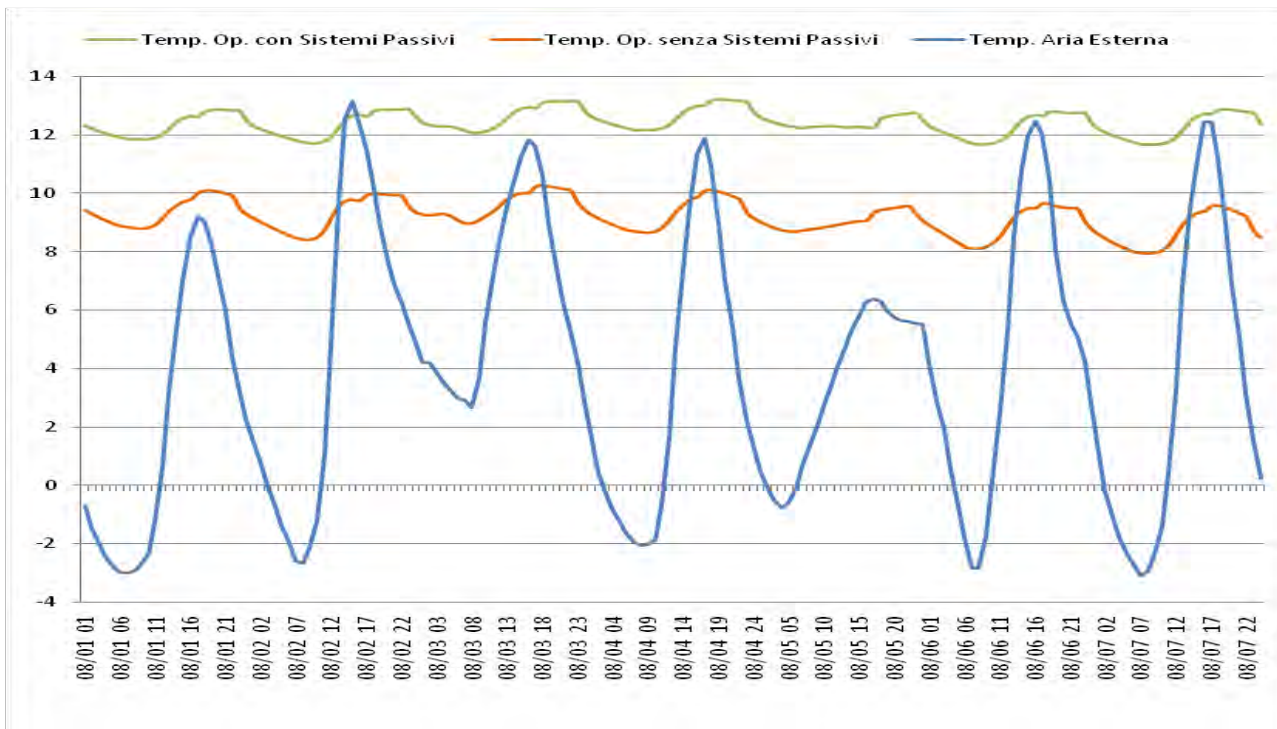
Fabbisogni mensili - Riscaldamento



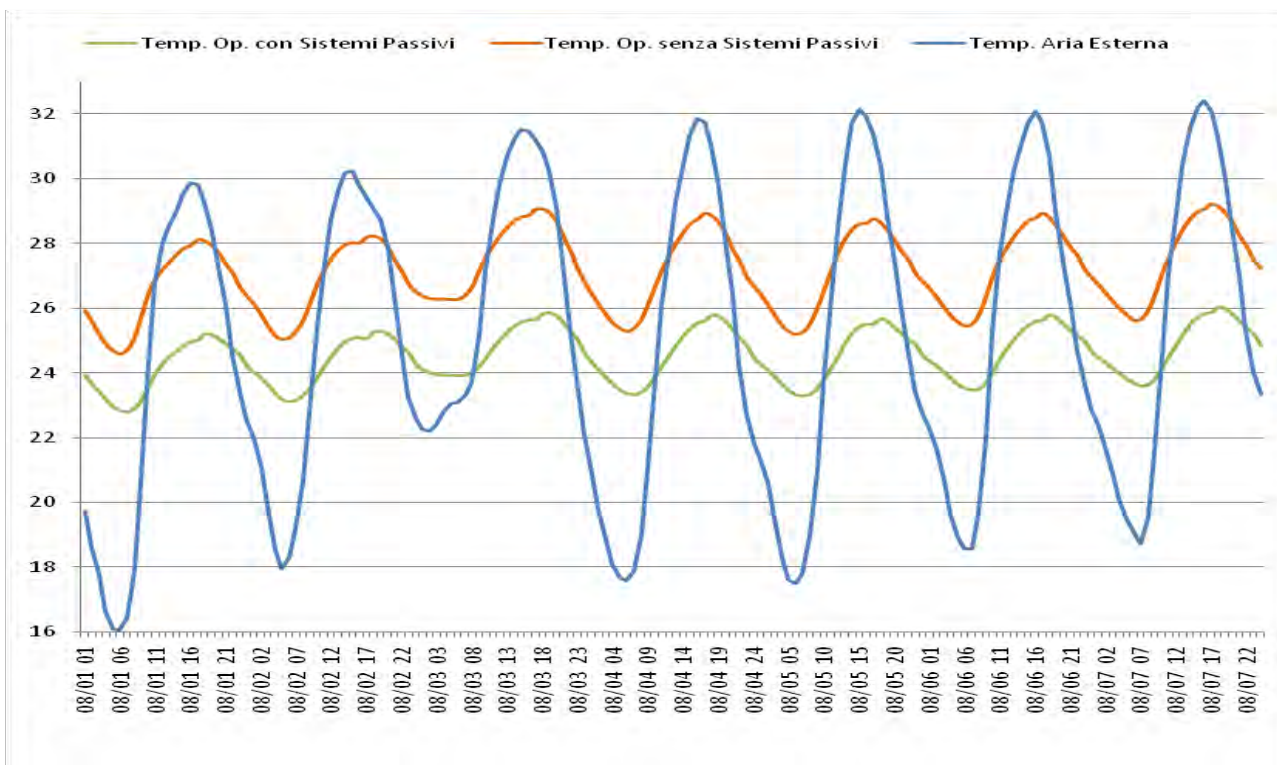
Fabbisogni mensili - Raffrescamento



Al fine di valutare meglio le prestazioni in riferimento al solo comportamento passivo, è stato valutato anche l'andamento delle temperature in due periodi estremi dell'anno ad impianti spenti (si è considerato comunque funzionante il sistema di ventilazione). I risultati sono illustrati da due grafici alla pagina seguente. In regime invernale le temperature si mantengono più alte di circa 3°C anche se rimangono distanti dalla soglia di comfort, mentre in estate l'edificio con i sistemi passivi può fare totalmente a meno della climatizzazione.



andamento delle temperature senza impianti in una settimana invernale particolarmente fredda



andamento delle temperature senza impianti in una settimana estiva particolarmente calda

Di particolare interesse è anche il procedimento adottato per la valutazione della ventilazione naturale estiva negli spazi comuni degli atri-serra. La stima della portata di ricambio ottenibile è infatti di primaria importanza nel calcolo delle prestazioni energetiche e ambientali e rappresenta uno dei punti critici nel processo di modellazione e simulazione dinamica (capitolo 4).

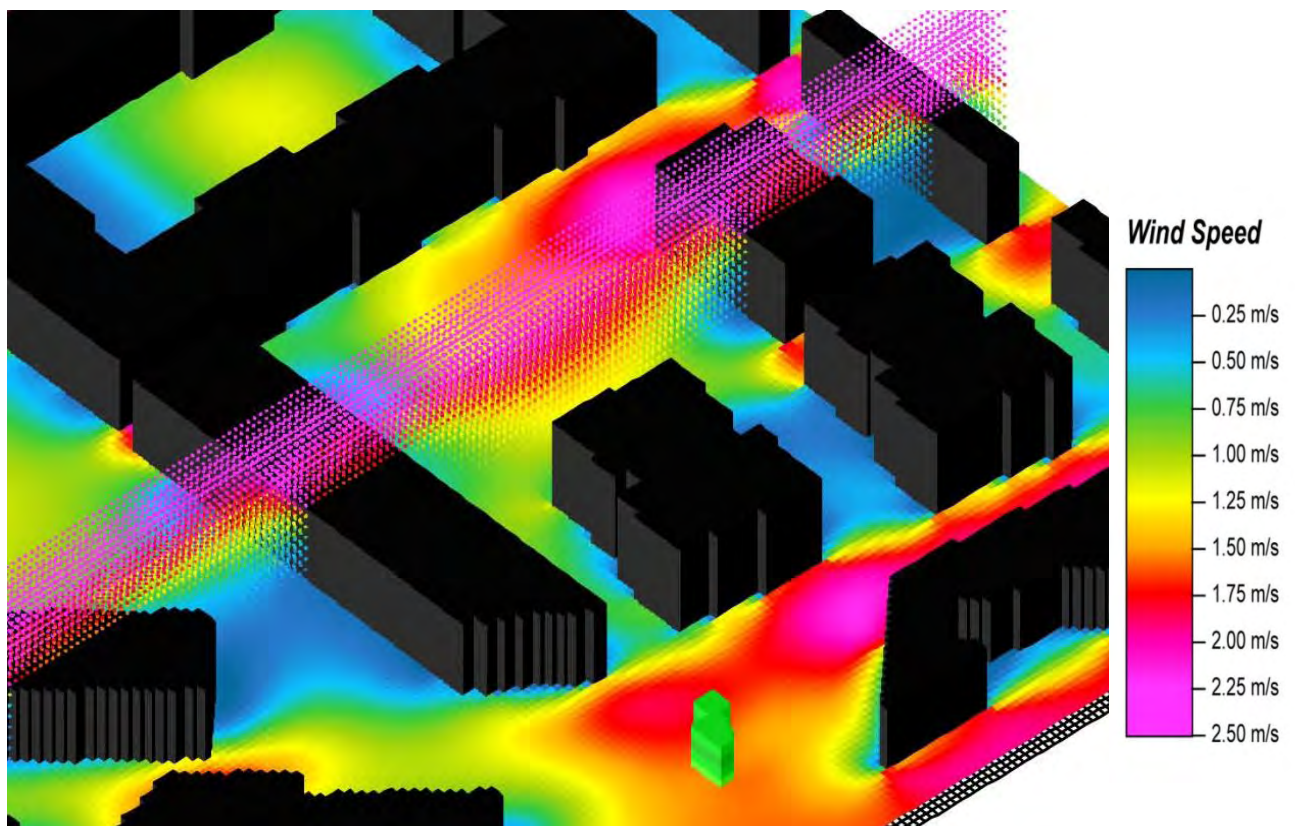
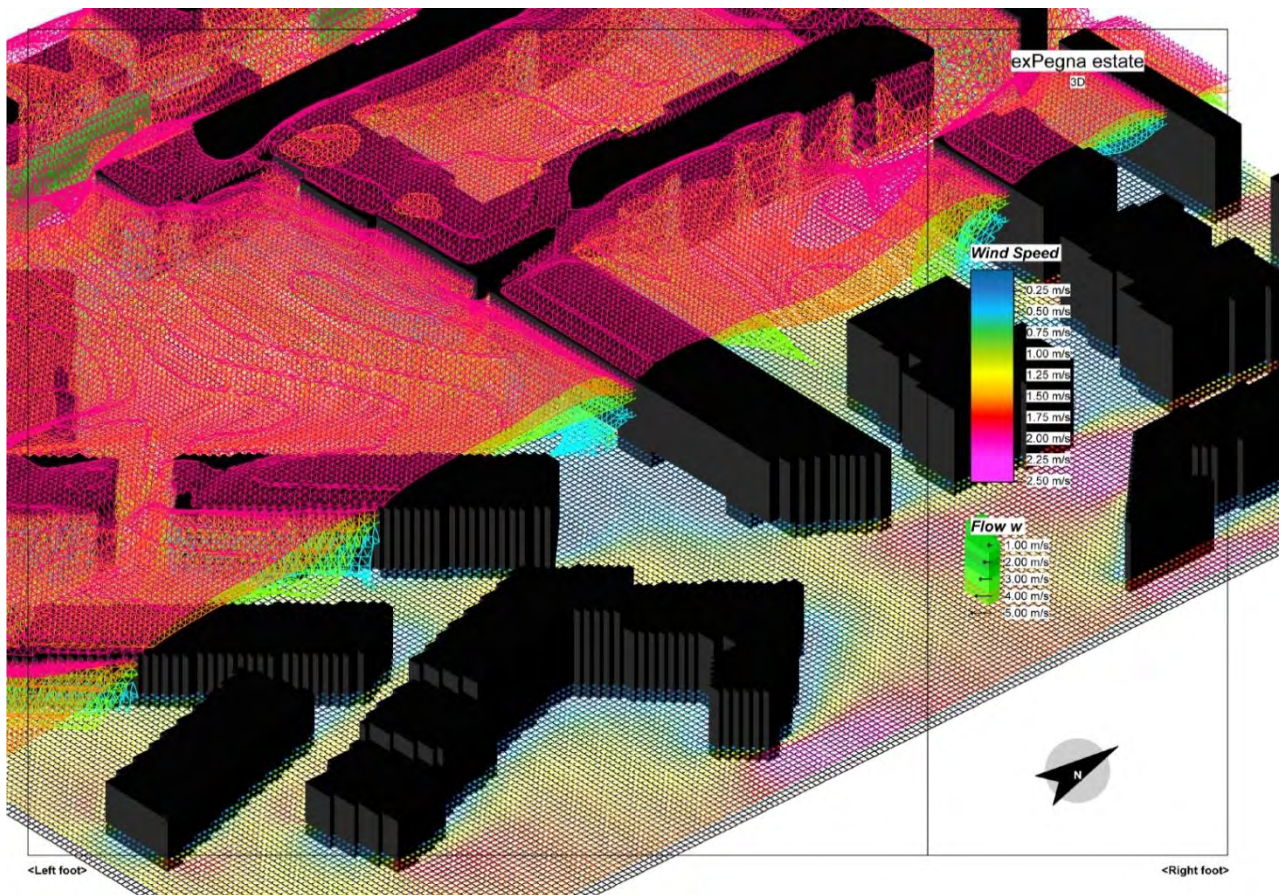
Nel caso in questione si è partiti dall'analisi delle medie climatiche della località per eseguire delle simulazioni fluidodinamiche a scala urbana, che restituissero l'andamento della correnti e dei campi di pressione nell'intorno dell'edificio. Le informazioni ottenute sono state poi utilizzate per stimare i coefficienti di pressione del vento sulle facciate dell'edificio attraverso i quali è possibile localizzare i punti migliori per il posizionamento delle superfici apribili e calcolare di conseguenza le portate di ventilazione. L'ultimo passaggio è stato quello di simulazione dei flussi interni agli ambienti per mezzo della fluidodinamica computazionale. Tali simulazioni hanno consentito di valutare diverse opzioni di assetto degli spazi, fornendo indicazioni sia sulle condizioni di comfort che sulla resistenza all'aria opposta dagli ostacoli interni. Quest'ultima informazione a sua volta è servita per aggiornare le stime sulle portate complessive e iterare la procedura.

Di seguito viene proposta una sintesi dei dati di partenza e dei risultati ottenuti. Per gli ambienti in questione è stato stimato un ricambio medio di circa 18-20 volumi orari.

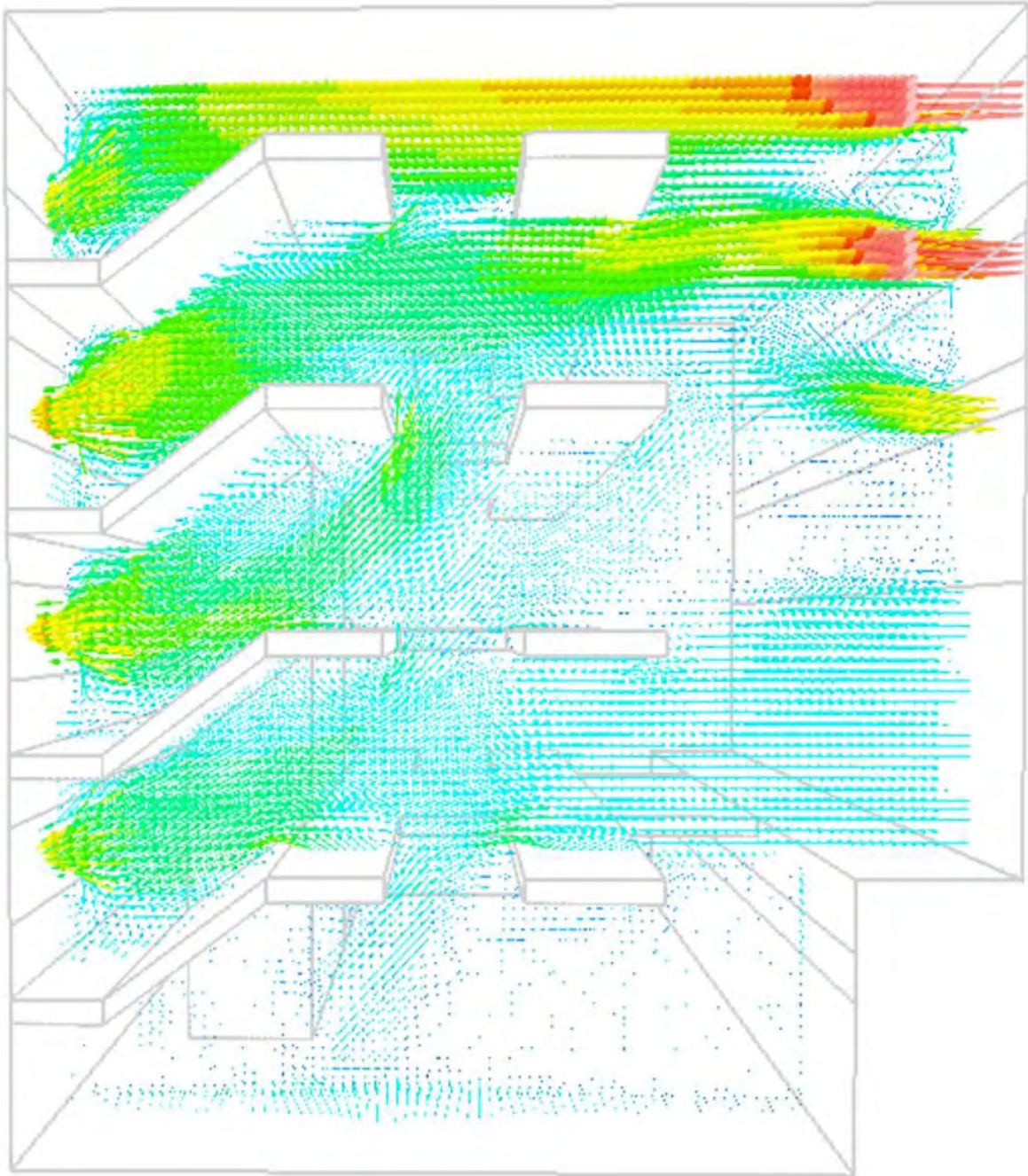
*velocità e direzione media del vento **

Mese	Direzione	Velocità (m/s)	Probabilità Beaufort >4
Gennaio	N-NE	2,6	9
Febbraio	N-NE	2,6	11
Marzo	N-NE	3,1	16
Aprile	O-SO	3,1	15
Maggio	O-SO	3,1	10
Giugno	O-SO	2,6	6
Luglio	O-SO	2,6	9
Agosto	O-SO	2,6	8
Settembre	O-SO	3,1	2
Ottobre	N-NE	3,1	12
Novembre	N-NE	2,1	5
Dicembre	N-NE	2,1	6

** oltre a questi dati, rilevati nel periodo 2009-2011 (fonte: windfinder.com), sono stati presi in considerazione anche quelli dell'aeronautica militare, rilevati nel trentennio 1960-1990)*



situazione generale della ventilazione estiva prevalente e gradiente di velocità sulla facciata dell'edificio



ventilazione naturale estiva nell'atrio-serra simulata per mezzo della fluidodinamica computazionale

G. OTTIMIZZAZIONE DELLE SERRE SOLARI DI UNA SCUOLA A CIVITAVECCHIA



Anno	2011
Località	Civitavecchia (RM)
Tipologia	Edificio scolastico
Progetto	Comune di Civitavecchia ESE engineering srl (oggetto della gara d'appalto)
Analisi/simulazioni	Marco Cimillo (per un gruppo partecipante)

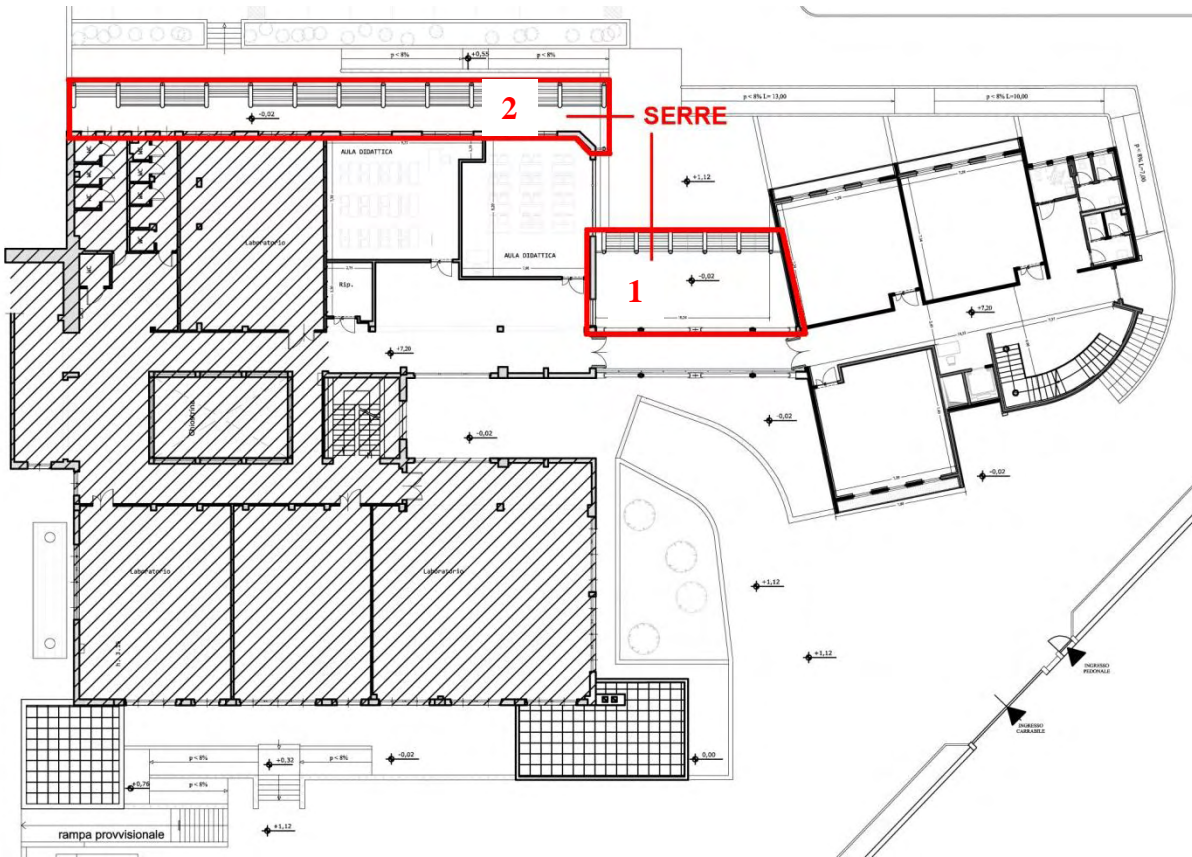
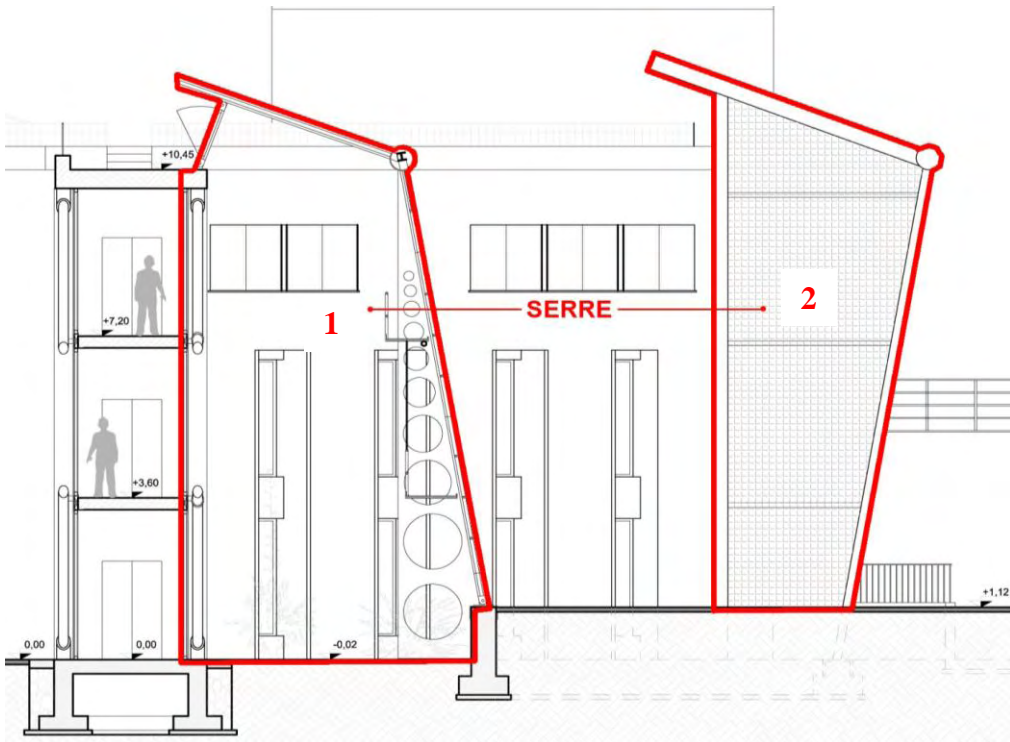
Le due serre bioclimatiche esaminate fanno parte del progetto di ristrutturazione e ampliamento di un complesso scolastico, per la cui realizzazione è stata bandita una gara dalla Provincia di Roma nel 2011. Uno degli punti che si chiedeva di approfondire e che venivano valutati ai fini dell'assegnazione del lavoro era proprio l'ottimizzazione energetica dello sfruttamento di tali elementi solari.

Gli aspetti considerati nella fase di studio e analisi sono stati la scelta dei componenti di involucro, il posizionamento delle parti apribili per la ventilazione naturale ed il possibile utilizzo delle serre per il preriscaldamento dell'aria di rinnovo delle aule. Per ottenere una valutazione completa delle prestazioni si è tenuto conto delle prestazioni energetiche invernali ed estive e dell'illuminazione naturale degli ambienti adiacenti alle serre. Al tal fine, per osservare gli effetti delle scelte operate su un ampio numero di parametri si sono utilizzate delle simulazioni dinamiche, con il supporto delle fluidodinamica computazionale e di un software per il calcolo illuminotecnico.

Anche se l'edificio non funziona nelle settimane più calde di luglio e agosto, le prestazioni estive erano da considerare di rilievo, sia per il clima relativamente mite della località, sia per l'esposizione a sud-est delle superfici captanti. Il progetto originale prevedeva infatti di mantenere opache alcune porzioni di involucro e di utilizzare dei vetri selettivi e isolanti per le restanti, una soluzione prudente ma fortemente limitativa per la principale funzione di riscaldamento passivo delle serre.

Stazione Meteo: **Roma Fiumicino** 41° 47' N, 12° 13' E - 3 m s.l.m

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Tmax (°C)	13	14	15	18	22	26	29	29	26	22	17	14
Tmed (°C)	8,5	9	10,5	13	16,5	21	23,5	23,5	21	16,5	12,5	9,5
Tmin (°C)	4	4	6	8	12	16	18	18	16	12	8	5
U.R. (%)	75	75	75	75	75	73	72	73	75	76	77	77
Vel. Vento (m/s)	2,6	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	2,6	2,6	2,6
Rad. Glob. (W/mq/gg)	1.670	2.290	3.660	4.980	6.010	6.610	6.630	5.850	4.510	3.060	1.930	1.470



Sezione e pianta con individuazione delle serre bioclimatiche

Le analisi effettuate hanno portato a proporre, l'adozione di vetri chiari che, pur presentando una trasmittanza termica più elevata, garantiscono nel complesso un bilancio termico più conveniente grazie al maggiore coefficiente di trasmissione solare. Tali vetri son inoltre più economici di quelli originariamente previsti e assicurano una migliore illuminazione naturale degli ambienti retrostanti.

Per scongiurare il rischio di un surriscaldamento indesiderato nei periodi più caldi dell'anno si è proposta la dotazione di tendaggi interni diffondenti, che mantengono un certo livello di illuminazione bloccando l'irraggiamento diretto su superfici e occupanti, e la predisposizione di aperture esterne posizionate in base a campo di pressione generato dal vento sulle facciate e in grado di garantire circa 20 volumi orari di ricambio per ventilazione naturale.

Le aperture sono disposte nella maniera seguente:

Serra 1 : 25% delle fasce centrale ed inferiore sulla facciata ovest
 50% della fascia in alto ad a est

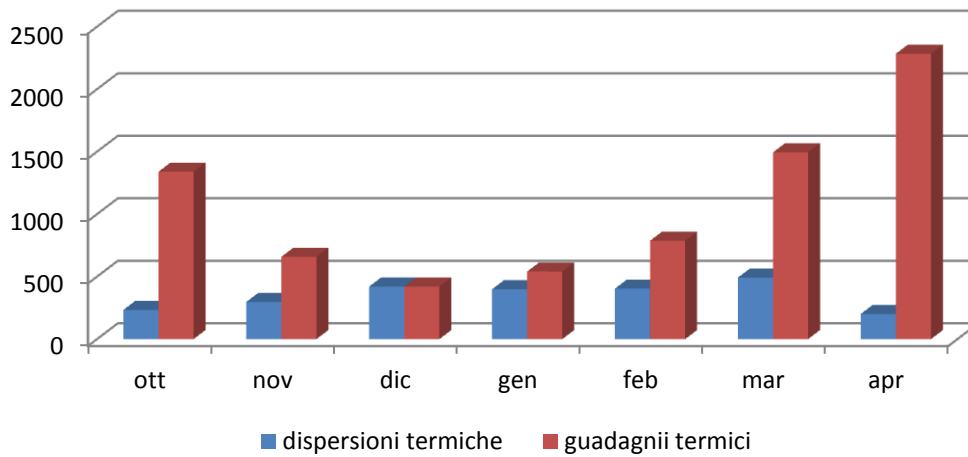
Serra 2 : 10% delle tre fasce sulla facciata ovest in prossimità dei lati corti
 30% della fascia in alto ad a est
 35% delle vetrate sui fronti corti a nord e sud

Di seguito è riportata una sintesi delle analisi condotte, i risultati si riferiscono a sistemi di vetratura con le seguenti caratteristiche:

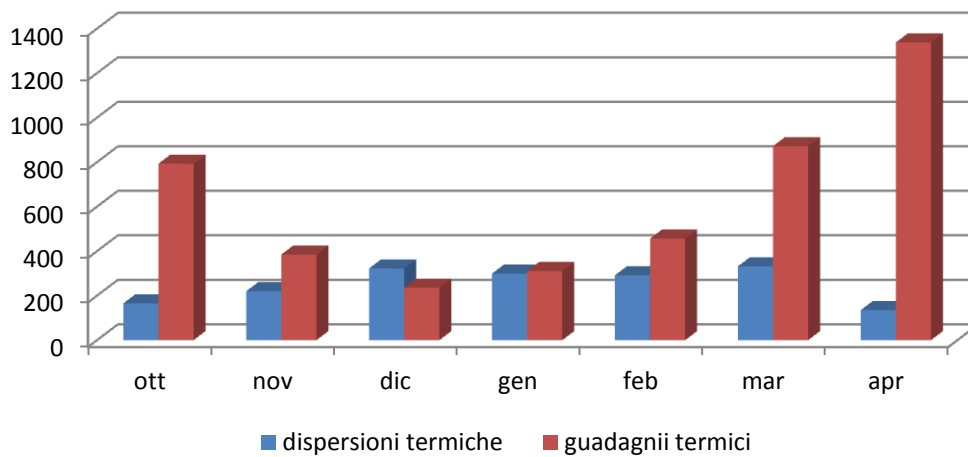
- progetto originale:	Trasmittanza termica	U	1,40 W/mq.K
	Fattore solare	FS	35 %
	Trasmissione luminosa	TL	45%
- progetto ottimizzato:	Trasmittanza termica	U	1,95 W/mq.K
	Fattore solare	FS	63 %
	Trasmissione luminosa	TL	76 %

I dati raggruppati su base mensile si riferiscono comunque a simulazioni dinamiche effettuate su base sub-oraria.

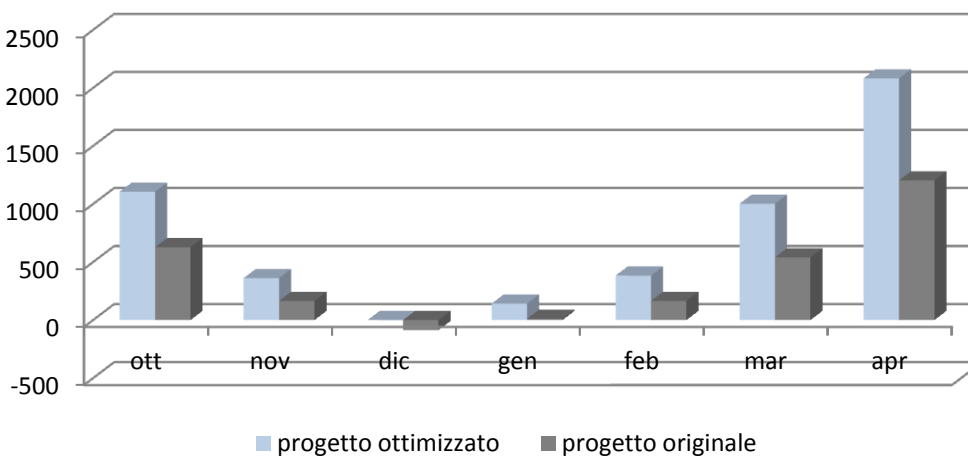
Serra 1: progetto ottimizzato



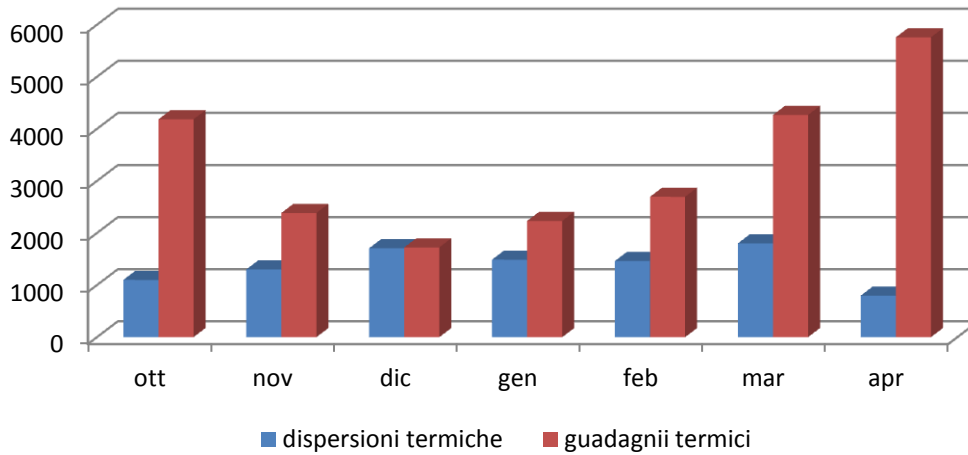
Serra 1: progetto originale



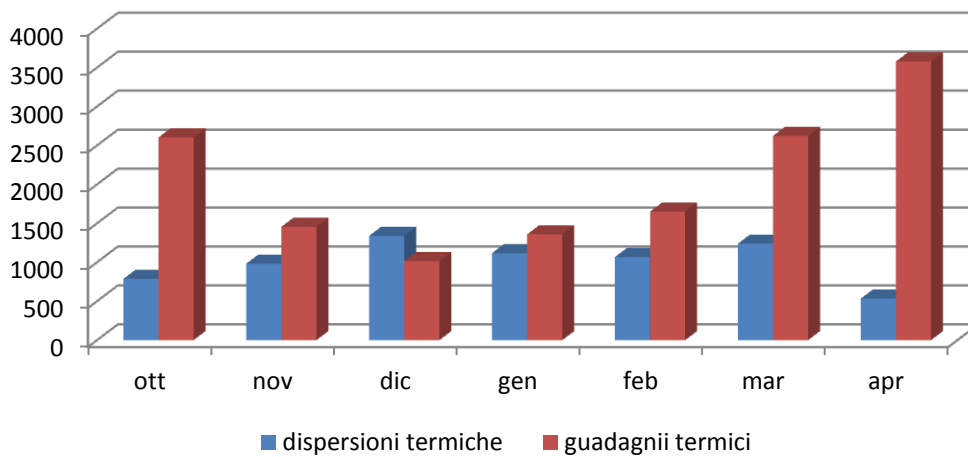
Serra 1: bilancio



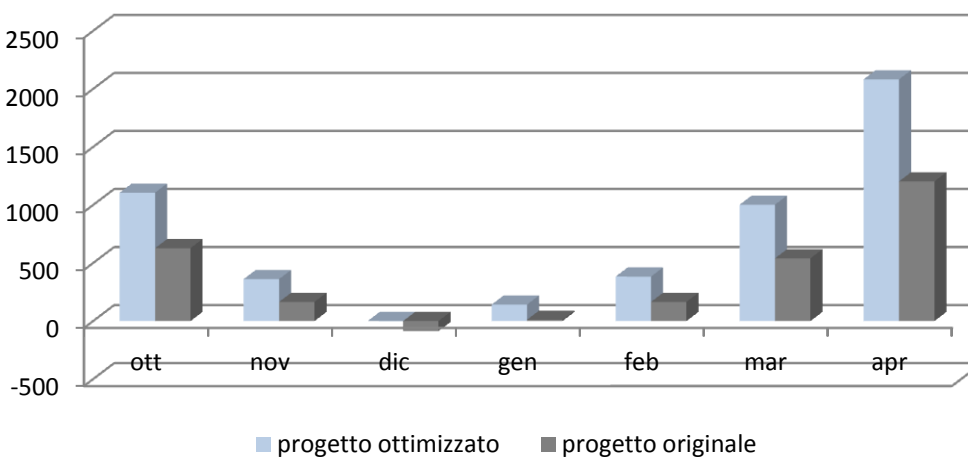
Serra 2: progetto ottimizzato



Serra 2: progetto originale

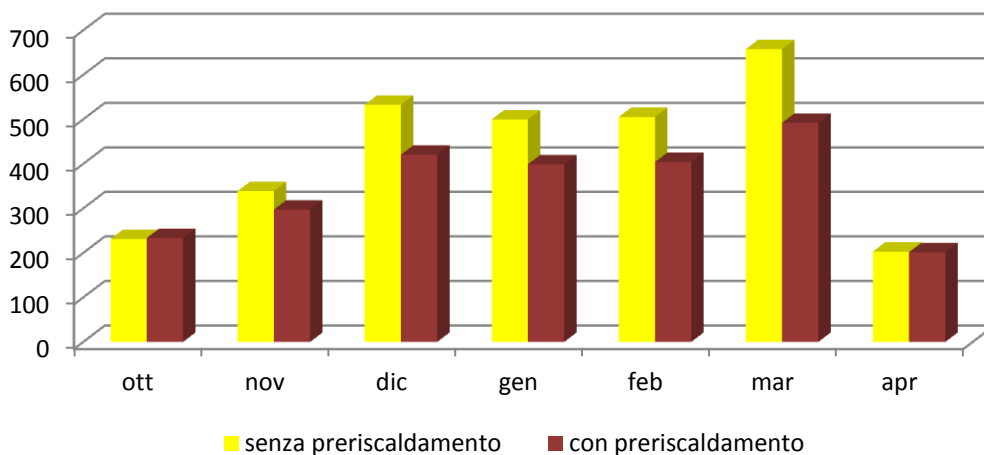


Serra 2: bilancio

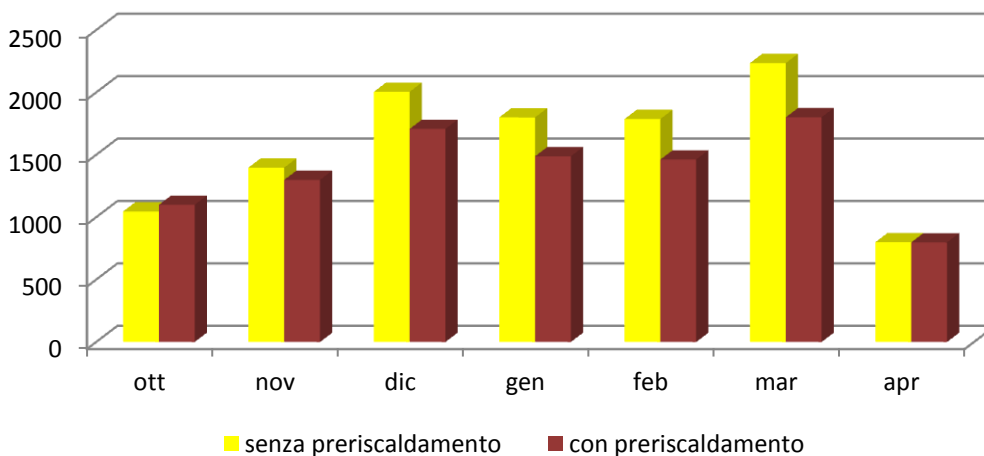


Per valutare gli aspetti legati al preriscaldamento dell'aria di rinnovo nelle serre l'edificio è stato simulato con e senza il sistema in uso. Nei grafici seguenti sono rappresentate le dispersioni termiche dell'involucro vetrato nei 2 casi e il sistema risulta doppiamente vantaggioso: oltre a produrre un beneficio in termini energetici sul trattamento dell'aria di rinnovo, il fatto che la temperatura si mantenga più bassa limita le dispersioni rendendo conveniente l'uso di una vetrata con prestazioni termoisolanti meno elevate.

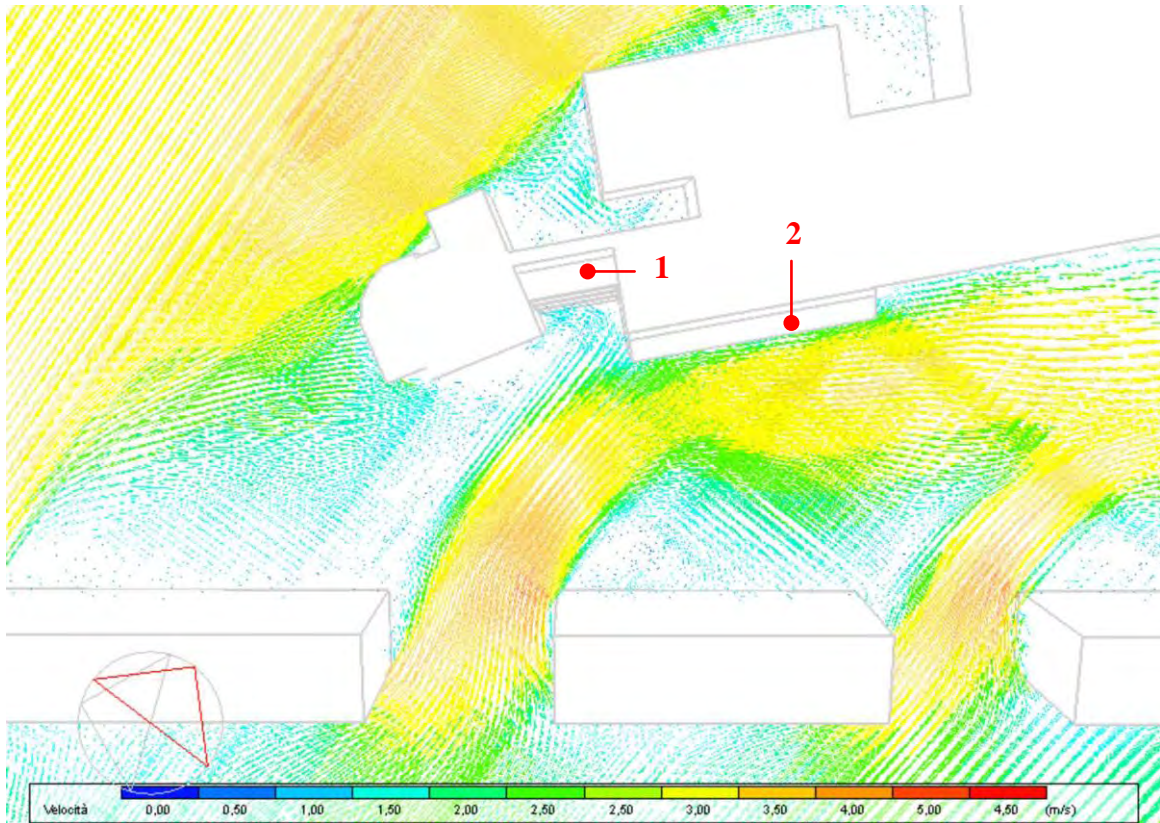
Serra 1: dispersioni termiche



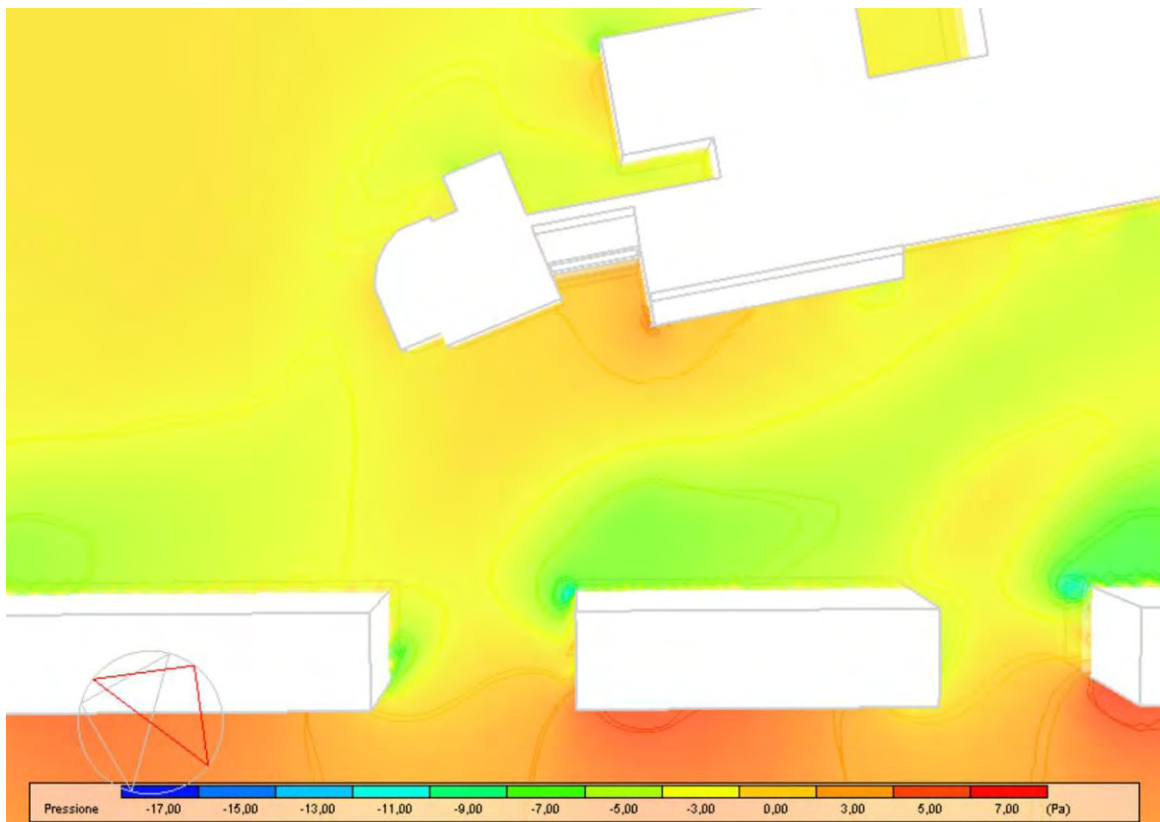
Serra 2: dispersioni termiche



Nella pagina successiva sono riportate due immagini relative alle simulazioni fluidodinamiche che hanno guidato il posizionamento delle aperture esterne.



flussi d'aria intorno all'edificio in una situazione estiva tipica



campo di pressione intorno all'edificio in una situazione estiva tipica

6. Possibilità di inclusione dei sistemi passivi nella valutazione delle prestazioni energetiche: due strategie alternative

Sono individuate due possibili applicazioni delle simulazioni dinamiche nella valutazione dei sistemi passivi. La prima prevede l'utilizzo diretto della metodologia in fase di certificazione e presuppone la validazione di uno strumento di calcolo attraverso una procedura fissata a livello europeo. La seconda riguarda l'uso delle simulazioni dinamiche come strumento di ricerca attraverso il quale aggiornare i metodi di calcolo più semplificati attualmente in uso al fine renderli adatti alla valutazione di sistemi passivi.

6. Opportunities for inclusion of passive systems in the assessment of energy performance: two alternative strategies

Two possible applications of the dynamic simulation in the assessment of passive systems are identified. The first is about the direct use of the methodology in the certification phase and requires the validation of a calculation tool through a standardized European procedure. The second concerns the use of dynamic simulations as a research instrument by which to adapt simplified methods in use in order to make them suitable for passive systems.

Applicazione diretta delle simulazioni dinamiche

Le simulazioni dinamiche, come si è illustrato nel precedente capitolo, sono già utilizzate (anche se non in maniera diffusa) per supportare gli aspetti energetici ed ambientali della progettazione, particolarmente per edifici che si propongono di raggiungere elevati standard di efficienza e comfort ambientale o che impiegano sistemi sperimentali, innovativi o comunque complessi e particolarmente legati alle condizioni ambientali o ai fenomeni dinamici. La metodologia è da considerare inoltre particolarmente utile nella progettazione e verifica dei sistemi passivi, per i quali non sono disponibili metodologie consolidate simili a quelle utilizzate per i sistemi impiantistici tradizionali (capitolo 2).

Per un uso di questo tipo, ristretto cioè nell'ambito del gruppo di progettazione che lavora sull'edificio, non si rendono strettamente necessari dei protocolli formalmente riconosciuti e la qualità dei risultati è garantita essenzialmente dalla professionalità di chi esegue analisi e simulazioni. I punti fondamentali per il nel raggiungimento di risultati accettabili sono:

- la competenza tecnica dell'operatore sugli aspetti oggetto della simulazione;
- la conoscenza del modello utilizzato, compresi il campo di applicabilità, le generalità degli algoritmi di calcolo, il grado di incertezza insito nei risultati ottenuti;
- l'utilizzo di strumenti di simulazione affidabili e validati (da un punto di vista tecnico e non necessariamente in conformità alla legislazione nazionale o locale, ad esempio BESTEST, cap. 4);
- la corretta selezione degli input, anche in rapporto allo scopo della simulazione, allo strumento utilizzato ed alla reale conoscenza dell'oggetto modellato e del suo contesto;
- la corretta comunicazione dei risultati, compresi i margini di incertezza insiti nel calcolo, che devono essere considerati nella formazione delle decisioni conseguenti.

Da un punto di vista tecnico sussistono già le condizioni per un corretto utilizzo della metodologia, il cui problema principale è semmai la scarsa diffusione, già motivata nei precedenti capitoli.

Va tuttavia rilevato che quando l'utilizzo delle informazioni si allarga a soggetti esterni ai gruppi di progettazione, anche al di fuori della certificazione energetica, si entra nell'ambito delle diagnosi energetiche, che, definite formalmente dalle direttive europee e dalle leggi nazionali, avrebbero necessità di avvalersi di metodi e professionisti riconosciuti alla stregua delle certificazioni, sulle quali comunque è focalizzata l'attenzione di questa ricerca.

Perché le simulazioni dinamiche possano essere riconosciute ai fini della certificazione energetica l'insieme delle regole al precedente elenco deve invece essere sicuramente formalizzato. Il quadro legislativo Italiano ed europeo, ancora in via di definizione (cap. 1), prevede già meccanismi per l'accreditamento dei certificatori e procedure per la comunicazione dei risultati, così come un quadro normativo sui metodi di calcolo (cap.3).

Questi ultimi sono definiti in un quadro comune al livello europeo e specificati a livello nazionale e locale, sia dal punto di vista strettamente legislativo che della normativa tecnica. In Italia le simulazioni dinamiche sono presenti in entrambi i settori, anche se in maniera piuttosto vaga. Il D.P.R. 59 del 2 aprile 2009, impone di valutare

“l’influenza dei fenomeni dinamici, attraverso l’uso di opportuni modelli di simulazione”,

ma la prescrizione è limitata agli edifici di nuova costruzione del settore terziario con volumetria superiore ai 10.000 mc e

“salvo che si possa dimostrare la scarsa rilevanza di tali fenomeni nel caso specifico”.

In maniera analoga la norma UNI TS 1300, metodo di calcolo *ufficiale* in Italia si riferisce così alle simulazioni dinamiche nel paragrafo introduttivo alla norma:

“L’utilizzo di tali metodi, opportunamente validati in conformità alla UNI EN 15265, è da ritenersi sempre possibile ed in alcuni casi preferibile, in alternativa al metodo mensile a cui le presenti linee guida si riferiscono, una volta che sono disponibili dati climatici orari della località considerata.”

Di fatto non esistono dunque veri obblighi e se anche si volessero applicare le simulazioni dinamiche non risulterebbero disponibili software commerciali validati secondo la norma citata. Al momento l’unico strumento di un certo rilievo validato secondo lo standard citato sembra essere Esp-r¹⁹ (cap. 4). Per la validazione è stato modificato il codice del software (sembrerebbe solo per recepire i dati di input della norma), ma non è disponibile un rapporto di validazione e non è chiaro se le modifiche al codice siano state recepite dalle versioni attuali (ammesso che questo fosse necessario).

Dato che i metodi di calcolo utilizzati pregiudicano la corretta valutazione dei sistemi passivi (cap. 3), come parte di questa ricerca, per consentire l’utilizzo immediato di un strumento di simulazione dinamica con caratteristiche tali da renderlo adatto alle applicazioni su edifici che includano sistemi passivi, si è proceduto alla validazione del software EnergyPlus secondo la Norma UNI EN 15265. Tale passaggio, con l’inclusione del rapporto di validazione completo richiesto dallo standard, rende il software conforme alle richieste della norma UNI TS 11300 e pertanto sempre utilizzabile ai fini della certificazione energetica e delle diagnosi energetiche, nell’ambito delle quali potranno essere correttamente stimati i contributi di sistemi passivi anche di tipo innovativo e sperimentale.

¹⁹ Kokogiannakis G., *Support for the Integration of Simulation in the European Energy Performance of Buildings Directive*, Tesi di Dottorato, University of Strathclyde, 2008

Le simulazioni dinamiche come supporto a metodi stazionari o quasi stazionari

Una seconda possibilità per sfruttare le possibilità offerte dalle simulazioni dinamiche è il loro impiego come strumento di ricerca per la definizione di metodi di calcolo semplificati, che possano essere integrati nelle attuali procedure di calcolo. In questo modo, se pure non con la stessa precisione che deriva da un'applicazione diretta, è possibile tenere in considerazione i fattori dinamici, come già avviene generalmente in regime quasi stazionario. I risultati che si possono conseguire riguardano principalmente l'inclusione di sistemi per i quali al momento non esiste un modello di calcolo esplicito all'interno della procedura in vigore.

Il vantaggio di questa alternativa, nel confronto con la precedente, consiste nel fatto che la parte più specialistica, difficoltosa e lunga del lavoro viene concentrata nella fase di ricerca e all'utente finale è consegnato uno strumento di semplice applicazione e di funzionamento analogo a quelli già conosciuti e utilizzati.

Il risultato di ricerche di questo tipo può condurre a più tipi di risultati. Un possibile esito potrebbe essere l'aggiornamento delle stesse procedure di calcolo contenute nelle norme tecniche e in alcuni casi nei testi di legge. Se per un verso questo garantisce effetti molto incisivi ed estesi, per un altro necessità del recepimento dei risultati della ricerca nei testi normativi, con tutte le conseguenze che questo comporta in termini di tempo e di procedure e senza garanzie (almeno per una ricerca come la presente) del buon esito dell'iter.

Una strategia alternativa, di più basso profilo ma dagli effetti più immediati, è quella di fornire un *background* tecnico utile a fornire gli elementi necessari per l'inclusione dei sistemi studiati nei metodi di calcolo così come sono allo stato attuale. Con questo obiettivo, come parte della ricerca è stato studiato il sistema dei condotti interrati, per i quali non è definito un modello di calcolo all'interno della norma UNI TS 11300, che invece consentono di calcolare il contributo di generici sistemi di preriscaldamento. Al fine di poter calcolare in questa maniera il contributo dei condotti interrati, è stato definito un metodo semplificato per il calcolo dell'efficienza di scambio dei condotti e, conseguentemente, del fattore correttivo richiesto dalla norma.

L'obiettivo dello studio non è solo quello di definire tale metodo, ma anche (soprattutto) di sperimentare le potenzialità generali di una linea di ricerca sviluppata secondo i criteri descritti

PARTE III: RICERCA

Sono sviluppate le due ipotesi formulate nel capitolo 6: si procede alla validazione di un modello di simulazione dinamica (capitoli 7-8) e all'elaborazione di una procedura di calcolo semplificata per il sistema dei condotti interrati (capitoli 9-10).

PART III: RESEARCH

The two hypothesis advanced in chapter 6 are developed: a dynamic simulation model is validated (chapters 7-8) and a simplified calculation procedure is generated for buried earth pipes systems (chapters 9-10).

7. La validazione di un metodo di simulazione dinamica

Il capitolo descrive la procedura contenuta nella norma europea UNI EN 15265 per la validazione di un software di simulazione dinamica. Il sistema si basa sul rispetto di alcuni assunti di base e sulla valutazione dei risultati ottenuti in una serie di test di riferimento. Entrambi gli aspetti vengono esaminati, individuando alcuni punti critici.

7. The validation of a dynamic simulation method.

The chapter describes the procedure of European standard UNI EN 15265 for the validation of a dynamic simulation software. The system is based on the compliance to some basic assumptions and on the evaluation of the results obtained in a set of reference tests. Both aspects are examined, indentifying some critical points

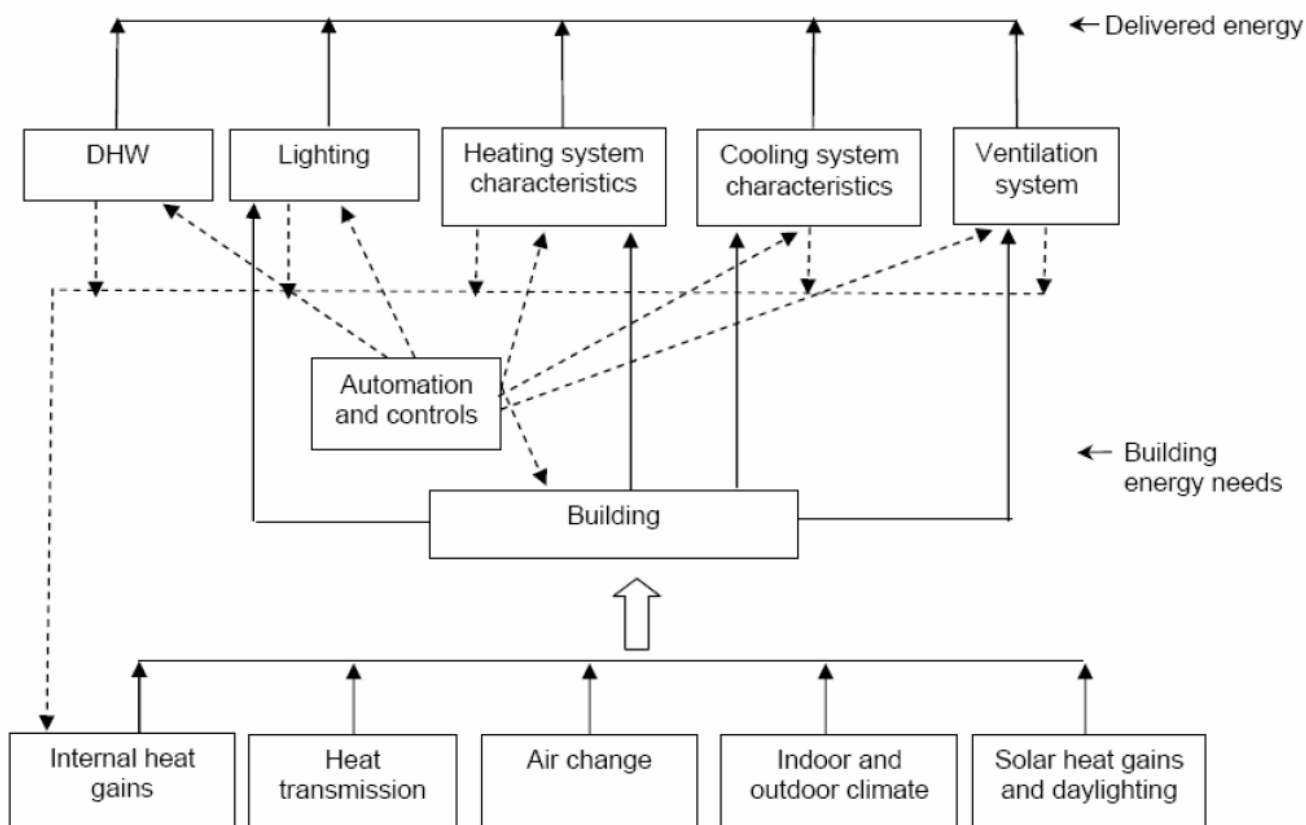
Procedura di validazione secondo la norma UNI EN 15265

Verrà qui descritta la procedura per la validazione di un software di simulazione dinamica prescritta dalla norma *EN 15625 – Thermal performance of buildings – Calculation of energy need for space heating and cooling – General criteria and validation procedures*. La norma recepita in Italia (in inglese) come UNI EN 15265 è stata elaborata nell'ambito del mandato M/343 della Commissione Europea e dell'EFTA al CEN a supporto della direttiva 2002/91/CE.

L'ottenimento di tale validazione rende il software utilizzabile per il calcolo dei fabbisogni termici ai fini della certificazione energetica.

Il campo di applicazione è limitato ai fabbisogni termici degli ambienti, con esclusione degli aspetti impiantistici. L'immagine seguente, tratta dalla norma, illustra lo schema dei flussi energetici dell'intero sistema ambiente-edificio-impianti e rappresenta con frecce tratteggiate i collegamenti fra edificio e impianti non compresi nelle finalità di cui sopra.

flussi di energia schematizzati nella norma UNI EN 15265



- convective
- radiative

- external components
- internal components

- infiltration
- ventilation

- air temperature
- radiant temperature
- operative temperature
- solar radiation

- windows
- opaque elements

I metodi che possono essere validati sono i modelli di calcolo dinamici (che operano quindi su base oraria o sub-oraria), da utilizzare per:

- descrivere le prestazioni energetiche di ogni ambiente di un edificio
- fornire dati energetici da utilizzare come interfaccia per altri metodi di valutazione dei sistemi impiantistici

Il calcolo deve basarsi su un modello dinamico di bilancio del calore sensibile che tenga in conto:

- il bilancio termico delle superfici esterne
- la conduzione termica attraverso l'involucro edilizio
- le capacità termiche delle strutture interne ed esterne
- il bilancio termico delle superfici interne
- il bilancio termico dell'aria
- il metodo di risoluzione del bilancio termico

Tutti gli altri elementi contenuti nella norma sottoforma di prescrizioni per le condizioni al contorno o i dati di input non sono considerati parte della procedura, ma sono necessari per i test di validazione da eseguire.

La procedura non specifica dunque un metodo di calcolo nei dettagli, ma consiste appunto nell'esecuzione di una serie di 12 test e nella comparazione dei risultati ottenuti con quelli di riferimento della norma. I primi quattro hanno valore puramente informativo, servono a familiarizzare con la procedura e non sono obbligatori. Per i rimanenti otto test è necessario invece che tutte le differenze fra i fabbisogni per riscaldamento e raffrescamento ottenuti e quelli di riferimento non siano superiore al 15% dei fabbisogni totali di riferimento. Se tutte le differenze sono al di sotto del 5% si ottiene un livello di accuratezza A, se sono comprese fra il 5 e il 10% un livello B, se sono superiori al 10% un livello C.

In sintesi il sistema è governato dalle seguenti equazioni:

$$\text{Livello A: } rQ_H \leq 0,05 \text{ and } rQ_C \leq 0,05$$

$$\text{Livello B: } rQ_H \leq 0,10 \text{ and } rQ_C \leq 0,10$$

$$\text{Livello C: } rQ_H \leq 0,15 \text{ and } rQ_C \leq 0,15$$

con

$$rQ_H = \frac{\text{abs}(Q_H - Q_{H,ref})}{Q_{tot,ref}}$$

$$rQ_C = \frac{\text{abs}(Q_C - Q_{C,ref})}{Q_{tot,ref}}$$

$$Q_{tot,ref} = Q_{H,ref} + Q_{C,ref}$$

e

Q_H fabbisogno di riscaldamento calcolato (con il software da validare)

$Q_{H,ref}$ fabbisogno di riscaldamento di riferimento (fornito dalla norma)

Q_C fabbisogno di raffrescamento calcolato (con il software da validare)

$Q_{C,ref}$ fabbisogno di raffrescamento di riferimento (fornito dalla norma)

$Q_{C,ref}$ fabbisogno di raffrescamento di riferimento (fornito dalla norma)

Per poter essere validato, oltre ad ottenere risultati conformi alle precedenti equazioni, il software deve rispettare una serie di pre-condizioni elencate negli assunti di base richiesti dalla norma sulle modalità di calcolo dei diversi aspetti considerati.

Le caratteristiche dei test di validazione e degli assunti di base saranno approfondite nei due successivi paragrafi.

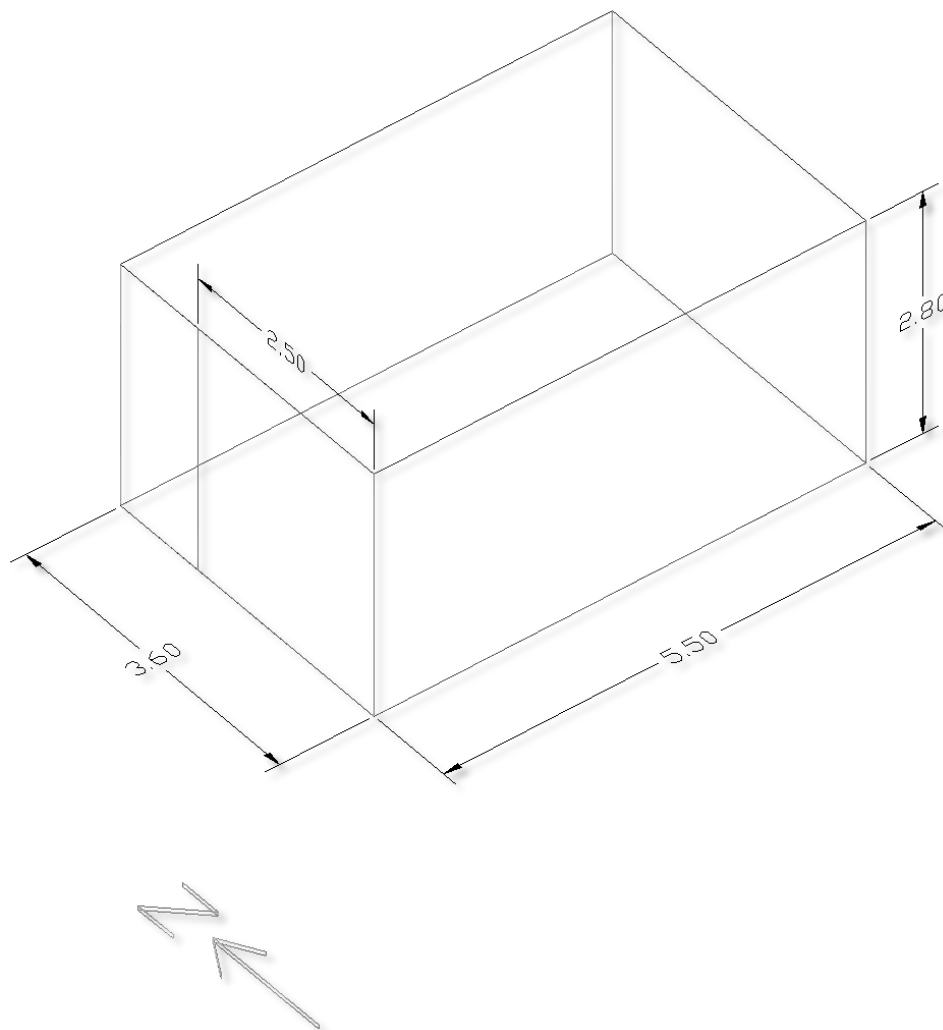
Al termine della procedura è infine necessario compilare un rapporto che contenga tutte le principali informazioni sui dati di input utilizzati e sui risultati di output ottenuti nel calcolo. Il capitolo 8 contiene tale rapporto per la validazione sul software EnergyPlus. All'interno di esso sono riportati anche i fabbisogni di riferimento di ogni test.

L'ottenimento di una validazione con tale procedura, secondo quanto prescritto dalla norma UNI TS 11300-1, rende possibile utilizzare un software in luogo della stessa norma 11300 per del calcolo dei fabbisogni termici ai fini della certificazione energetica.

Descrizione dei test di riferimento

Il meccanismo centrale della procedura di validazione consiste nell'esecuzione di 12 test (4 facoltativi e 8 obbligatori) sulla base dei quali confrontare i risultati del metodo da validare con quelli della norma. Tutti i test riguardano un singolo locale climatizzato di circa 20 mq da simulare con i dati climatici della località di Trappes, nei pressi di Parigi (49°N, 2°E). Ciò che cambia è la stratigrafia dei componenti opachi (maggiore o minore inerzia termica verso l'interno), la schermature solare (presente o assente), i carichi termici interni (presenti o assenti), il funzionamento degli impianti (continuo o intermittente) e l'esposizione della copertura (esterna o adiabatica). Il raggiungimento di un risultato conforme in tutte le situazioni dovrebbe garantire che il metodo è in grado di considerare in maniera corretta i diversi fenomeni fisici coinvolti nella determinazione dei fabbisogni termici ed in particolare quelli più critici: interazioni con la radiazione solare e accumulo/rilascio di energia nelle masse termiche.

Il locale ha la forma di un parallelepipedo di 5,5 x 3,6 x 2,8 m con l'unica superficie vetrata, da 7 mq (senza specifiche sulla lunghezza dei lati), rivolta verso ovest. Forma e dimensioni, così come sono state inserite nel modello di simulazione, sono raffigurate dallo schema sottostante.



L'involucro è costituito da pacchetti multistrato che alternano materiali massivi ad altri isolanti, mentre la superficie vetrata è caratterizzata da un doppio vetro protetto, solo in alcuni casi, da una schermatura esterna parallela ad esso e diffondente. Tutti gli eventuali ponti termici sono da trascurare nel calcolo.

Nei primi otto test tutti i lati del parallelepipedo, ad eccezione di quello finestrato ed esposto ad ovest, sono considerati adiabatici e quindi non sono partecipi degli apporti e delle dispersioni di calore, ma solo dell'inerzia termica del locale. Negli ultimi quattro test anche la copertura è esposta verso l'esterno.

In dettaglio i 12 test sono articolati in gruppi da 4 che al proprio interno contengono le varianti secondarie e si distinguono tra loro per varianti più significative, come il funzionamento degli impianti e l'esposizione della copertura.

Più in dettaglio:

1. **situazione di riferimento:** contiene il modello base sul quale sono applicate le varianti. Gli impianti sono sempre in funzione, mentre carichi termici e ventilazione funzionano in maniera intermittente
2. come il caso 1, ma con **inerzia modificata:** solaio e pavimento sono modificati per aumentarne la potenzialità di accumulo di calore
3. come il caso 1, ma **senza carichi interni:** tutti i carichi termici interni sono annullati
4. come il caso 1, ma **senza protezione solare:** la vetrata viene considerata priva di schermature

5. come il **caso 1**, ma con **impianti intermittenti**
6. come il **caso 2**, ma con **impianti intermittenti**
7. come il **caso 3**, ma con **impianti intermittenti**
8. come il **caso 4**, ma con **impianti intermittenti**

9. come il **caso 5**, ma con **copertura esterna**
10. come il **caso 6**, ma con **copertura esterna**
11. come il **caso 7**, ma con **copertura esterna**
12. come il **caso 8**, ma con **copertura esterna**

Tutti i dettagli su involucro, impianti, carichi termici e ventilazione sono descritti nel rapporto di validazione al capitolo 8.

L'edificio è piuttosto semplice ed i vari casi prospettati non presentano particolari difficoltà di modellazione. Elementi più problematici sono invece presenti nel rispetto degli assunti di base (di cui si dirà nel paragrafo successivo) e nell'utilizzo dei dati climatici. Questi ultimi sono forniti nel testo della norma ma non sono disponibili in un formato direttamente utilizzabile per le simulazioni. È stato dunque necessario costruire un nuovo file climatico, del tipo .epw a partire dai suddetti dati. Un'ulteriore difficoltà è nel modo in cui sono forniti i dati relativi alla radiazione solare. Nel testo dell'Annex A sono presenti infatti 3 tipi di valori:

- *DirN* radiazione normale diretta in W/m^2
- *DiffH* radiazione diffusa orizzontale in W/m^2
- *GWest* radiazione globale sul piano verticale occidentale (parete vetrata)

Mentre i primi 2 dati fanno parte di quelli rilevati dalle stazioni meteorologiche e inclusi nei database climatici, e possono pertanto essere recepiti nei file climatici, il terzo è un valore calcolato

dai software a partire dai primi 2 e da altre grandezze variabili e normalmente non può essere imposto a priori. È dunque a tutti gli effetti un risultato della simulazione e non un dato di input. La stessa norma infatti, al punto 6.2 fra i dati climatici richiesti per le simulazioni indica, relativamente alla radiazione solare i soli valori della radiazione normale diretta e di quella diffusa orizzontale. Sulla base di questi punti si è ritenuto di poter interpretare come un dato indicativo il valore relativo alla radiazione sulla parete ovest e si è operato in maniera indiretta per avvicinare il più possibile i valori calcolati a quelli richiesti dalla norma. Il meccanismo utilizzato per orientare il calcolo nella direzione voluta è stata la manipolazione dei valori mensili dell'albedo²⁰, un altro dei dati elencati al punto 6.2, che non rientra però tra quelli forniti dalla norma per Trappes. Regolando opportunamente le variazioni dell'albedo (*Ground Reflectance* in EnergyPlus) è stata ottenuta una sostanziale coincidenza fra i valori della norma e quelli calcolati con uno scarto massimo, su base mensile, dello 0,038%. Nella seguente tabella sono riportati i valori di albedo utilizzati e gli scarti fra i valori mese per mese.

Mese	<i>Ground Reflectance</i>	Scarto EN15265-EP
gennaio	0,369	-0,0245%
febbraio	0,370	-0,0279%
marzo	0,501	0,0017%
aprile	0,280	0,0089%
maggio	0,272	-0,0271%
giugno	0,270	0,0053%
luglio	0,217	-0,0293%
agosto	0,284	-0,0381%
settembre	0,275	-0,0005%
ottobre	0,351	0,0231%
novembre	0,257	0,0308%
dicembre	0,298	0,0087%

²⁰ Il rapporto fra radiazione riflessa e radiazione incidente al suolo

Assunti di base ed elementi problematici

Per essere validato, al metodo di calcolo è richiesto di rispettare una serie assunti di base considerati come *requisiti minimi*. Tali assunti in molti casi descrivono in realtà un quadro di semplificazioni che facilita il calcolo ma che può limitare gli aspetti innovativi tipici delle simulazioni dinamiche. In questo senso agiscono come una sorta di *requisiti massimi*. Una delle potenzialità tipiche delle simulazioni dinamiche è infatti quella di poter tenere in conto degli elementi di variabilità non solo per ciò che riguarda l'andamento dei fattori climatici esterni o del funzionamento degli impianti, ma anche in riferimento alle caratteristiche dei materiali e dei componenti dell'involucro architettonico. Inoltre vengono escluse alcune possibili raffinatezze del calcolo che potrebbero fornire informazioni più dettagliate sul funzionamento di alcune soluzioni progettuali.

L'insieme delle prescrizioni è raccolto nel seguente elenco:

1. il locale è considerato uno spazio chiuso delimitato da elementi di involucro
2. la temperatura dell'aria è considerata uniforme all'interno del locale
3. le proprietà termofisiche di tutti i materiali sono costanti e isotropiche
4. i coefficienti di convezione sono fissi
5. la conduzione di calore attraverso gli elementi è monodimensionale e le loro superfici sono considerate isoterme
6. i ponti termici possono essere rappresentati sia come elementi di dispersione del calore privi di inerzia termica o come elementi monodimensionali equivalenti dotati di massa termica e caratteristiche termiche ottenute da calcoli in regime stazionario
7. la distribuzione della radiazione solare sulla superficie degli elementi interni alla zona è fissa
8. la distribuzione della parte radiativa del flusso di calore dovuto a sorgenti interne è uniforme sulle superfici interne degli elementi di involucro del locale
9. i trasferimenti di calore per radiazione a onde lunghe e per convezione sulle superfici interne di ogni componente sono trattati separatamente
10. la dipendenza angolare delle proprietà di trasmissione solare dei vetri è tenuta in considerazione basandosi sulle informazioni del produttore o adottando un fattore costante di riduzione pari a 0,9
11. schermature mobili e schermature fisse sono tenute in considerazione in conformità alla norma EN ISO 13790
12. il trasferimento di calore attraverso i solai interrati (incluse le connessioni solaio-muri) sono trattate in conformità alla procedura dinamica fornita dalla norma EN ISO 13370.

Come già osservato, incluse nella precedente lista si trovano anche delle richieste che limitano alcune importanti potenzialità del calcolo dinamico e quindi escludono le applicazioni più evolute (o perlomeno il loro utilizzo nelle modalità più evolute). Ad esempio il fatto di dover considerare fissi i coefficienti di convezione e irraggiamento sulle superfici dell'involucro non permette di utilizzare informazioni, come la velocità del vento o la temperatura del cielo e delle superfici stesse, che invece sono disponibili nei modelli dinamici e possono aumentare la precisione del calcolo. La stessa considerazione è valida anche per il punto 3 che non consente di tenere in considerazione le variazioni dovute alle temperature o al contenuto di umidità o di includere materiali particolari, ad

esempio a cambiamento di fase, che hanno nella variabilità delle proprie caratteristiche l'elemento di maggiore interesse.

Anche l'impossibilità di tenere in considerazione le stratificazioni di temperature nell'aria all'interno dell'edificio è ostativa di alcune applicazioni più avanzate, come la valutazione del comfort interno per sistemi di ventilazione a dislocazione o di distribuzione del calore per convezione naturale nel caso di alcuni sistemi passivi. La norma si ripropone in effetti di calcolare i fabbisogni termici e non l'andamento delle condizioni di comfort, anche se i due aspetti, soprattutto nella ricerca di soluzioni particolarmente efficienti e raffinate non possono essere completamente separati.

Per quanto riguarda i sistemi passivi un ulteriore elemento limitativo è rappresentato dal punto 7, che non consente di calcolare l'andamento preciso dell'irraggiamento solare sulle superfici interne, aspetto che riveste un certo rilievo quando sono coinvolte superfici specifiche per l'assorbimento della radiazione.

Nel primo paragrafo del rapporto di validazione al capitolo 8 alcuni dei punti al precedente elenco saranno discussi in relazione alle caratteristiche del software esaminato.

8. Rapporto di Validazione di EnergyPlus (UNI EN 15265)

La procedura precedentemente descritta è applicata al software di simulazione dinamica EnergyPlus, che risulta validato in una determinata configurazione e può pertanto essere utilizzato ai fini della certificazione energetica. Si tratta di un sistema particolarmente avanzato, sviluppato e messo a disposizione liberamente dal Department of Energy degli Stati Uniti e dai Berkeley Laboratories, che consente di valutare anche le prestazioni di sistemi passivi complessi. Il capitolo contiene il rapporto richiesto dalla norma e include, oltre ai contenuti minimi riguardanti dati di input e risultati di output, la descrizione delle caratteristiche del software in rapporto agli assunti della norma e la discussione degli elementi di maggiore problematicità.

8. Validation report for EnergyPlus (UNI EN 15265)

The procedure previously described is applied to the dynamic simulation software EnergyPlus, that is validated under a determined configuration. It is an extremely advanced system, developed and freely made available by the Department of Energy of the United States and by the Berkeley Laboratories, able to assess the performance of even complex passive systems. The chapter contains the validation report requested by the standard and includes, in addition to minimum contents dealing with input data and output results, the description of the software features in relation to the standard assumptions. The most problematic points are discussed.

Caratteristiche del software, assunti di base e risultati generali

Il modello di calcolo sottoposto alla procedura di validazione è EnergyPlus. Si tratta di un modello tra i più avanzati, sviluppato negli Stati Uniti dal *Department of Energy* e dai *Lawrence Berkeley National Laboratories* (capitolo 4).

Il software è stato scelto per le sue caratteristiche, che includono moduli per la modellazione di specifici sistemi passivi e, più in generale, delle interazioni termo- e fluido-dinamiche tra le varie parti dell'edificio. Ciò consente di simulare pressoché qualunque sistema passivo, per quanto sperimentale. Sono inoltre presenti anche sistemi di modellazione di componenti avanzati quali materiali a transizione di fase.

Il modello è peraltro già ampiamente validato attraverso diversi procedimenti, in particolare²¹:

Test analitici:

- HVAC tests, basati sull' ASHRAE Research Project 865
- Building fabric tests, basati sull' ASHRAE Research Project 1052

Test Comparativi:

- ANSI/ASHRAE Standard 140-2007
- International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme (IEA SHC) BESTest (Building Energy Simulation Test) methods not yet in Standard 140
- EnergyPlus HVAC Component Comparative tests
- EnergyPlus Global Heat Balance test

Tali procedure, che garantiscono in pieno l'attendibilità tecnico-scientifica del modello, non sono tuttavia valide ai fini del riconoscimento per la certificazione energetica. EnergyPlus è stato pertanto sottoposto alla procedura precedentemente descritta in un'ampia varietà di configurazioni al fine sia di trovarne una che ne consentisse la validazione sia di testare le differenze nei risultati. In merito alla norma, sono qui riproposti alcuni degli assunti di base elencati nel capitolo 7 che presentano, in relazione al software ed ai test eseguiti, elementi di particolare interesse o difficoltà

1. la temperatura dell'aria è considerata uniforme all'interno del locale

EnergyPlus consente di utilizzare diversi modelli di distribuzione della temperatura, fra cui alcuni specifici dedicati alla ventilazione incrociata ed alla ventilazione a dislocazione. Il modello a temperatura uniforme è comunque l'impostazione di default e può comunque essere selezionato esplicitamente scegliendo *mixing* alla voce *room-Air modelling Type* dell'elemento omonimo. Si tratta di uno dei casi in cui non possono essere utilizzate le caratteristiche più avanzate del modello.

2. i coefficienti di convezione sono fissi

EnergyPlus normalmente calcola in maniera dinamica tali coefficienti in base ai risultati della simulazione ed agli algoritmi scelti dall'utente, è comunque possibile bloccarli su valori predefiniti utilizzando l'elemento *SurfaceProperties:ConvectionCoefficients*. In alternativa per l'eterno si

²¹ http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm

possono fissare delle condizioni controllate (compresi i coefficienti di convezione e irraggiamento) mediante l'elemento *OtherSideCoefficient*.

Le due soluzioni sono state entrambe sperimentate.

3. la distribuzione della radiazione solare sulla superficie degli elementi interni alla zona è fissa

questa condizione si presenta problematica, perché il programma tratta in maniera diversa il problema. Sono presenti 5 alternative che consentono di calcolare in maniera più o meno dettagliata (tenendo conto degli ostacoli esterni e delle riflessioni) la radiazione incidente sulle superfici esterne ed interne. Se si esclude il calcolo di dettaglio all'interno tutta l'energia è ricevuta dal pavimento del locale e la parte riflessa da esso (in accordo con le caratteristiche superficiali impostate) viene distribuita uniformemente su tutte le altre superfici interne. Le possibili soluzioni individuate per il recepimento di questo punto sono:

- la modifica dei valori di assorbanza solare del pavimento, che verrebbero ridotti per limitare l'assorbimento alla quota effettivamente spettante alla superficie secondo la sua estensione. Tale soluzione consente di non alterare le caratteristiche del vetro ma è piuttosto macchinosa e sarebbe di difficile applicazione nel caso di edifici più grandi e complessi di quello del test eseguito per la validazione.
- l'introduzione di una superficie schermante interna totalmente diffondente e totalmente trasmissiva. In questo caso la radiazione in ingresso viene interamente diffusa e distribuita in accordo alle prescrizioni della norma. Un potenziale problema è l'influenza di tale superficie sulla trasmittanza termica della finestra.

Dopo una serie di test, è stata scelta la seconda ipotesi e il problema relativo alla trasmittanza è stato risolto modellando un'intercapedine ventilata di 1 metro di spessore (ciò non ha effetto sulla diffusione totale della radiazione) tra i 2 elementi che annulla la resistenza termica aggiuntiva dovuta allo strato d'aria. L'elemento utilizzato nel software è *WindowMaterial:Shade*.

Riducendo la trasmittanza solare a 0,9 e impostando una capacità termica pressoché nulla è stato possibile recepire anche un'ulteriore richiesta della norma, che impone l'utilizzo di un fattore f_{sa} (*solar to air factor*) che ha lo scopo di trasformare in calore sensibile ricevuto dall'aria interna il 10% della radiazione in ingresso. Tale quota serve a modellare la presenza di elementi a bassa capacità termica (arredi etc.) che cedono rapidamente all'aria l'energia assorbita.

Acquisiti tali elementi, il modello è stato testato in diverse configurazioni. In particolare i parametri modificati nelle diverse alternative sono:

- *esposizione delle superfici esterne: Outdoors o OtherSideCoefficients (punto 2)*
- *distribuzione solare: FullExterior o FullExteriorWithReflections (punto 3)*
- *Time steps orari: 1, 4 o 6*

Per quanto riguarda il primo punto, l'utilizzo di condizioni controllate è un espediente per controllare i coefficienti di scambio superficiale, anche se si tratta di un procedimento che complica la modellazione e la rende meno coerente con le caratteristiche del software. L'oggetto *OtherSideCoefficients* è stato impostato con temperature sempre uguali a quelle esterne e coefficienti di scambio coerenti con quelli della norma.

L'adozione dei due diversi tipi di distribuzione solare invece non è legata alla norma, ma semplicemente alle diverse possibilità del programma. La prima alternativa FullExterior, calcola l'energia incidente tenendo conto anche delle ostruzioni esterne, ma non delle riflessioni, contrariamente alla seconda opzione. Altri algoritmi più precisi disponibili sono stati tralasciati in quanto non in linea con gli assunti di base della norma.

I time steps orari definiscono invece la frequenza con la quale vengono ripetuti i calcoli nell'arco di un'ora. Il minimo consentito sia dalla norma che dal programma è 1, il minimo consigliato dal software è 4, mentre il suo valore di default è 6. Sono dunque state sperimentate queste tre alternative.

Combinando le diverse opzioni si sono ottenuti 12 set di simulazioni per 12 test da eseguire ed un totale di 144 simulazioni. Il quadro riassuntivo dei set di simulazioni e dei risultati ottenuti è il seguente:

Set	Superfici esterne	Distribuzione Solare	Time steps	Validazione
1	outdoors	Full Exterior	1	non validato
2	outdoors	Full Exterior	4	non validato
3	outdoors	Full Exterior	6	non validato
4	outdoors	Full Exterior With Reflections	1	non validato
5	outdoors	Full Exterior With Reflections	4	validato
6	outdoors	Full Exterior With Reflections	6	non validato
7	Other Side Coefficients	Full Exterior	1	non validato
8	Other Side Coefficients	Full Exterior	4	non validato
9	Other Side Coefficients	Full Exterior	6	non validato
10	Other Side Coefficients	Full Exterior With Reflections	1	non validato
11	Other Side Coefficients	Full Exterior With Reflections	4	non validato
12	Other Side Coefficients	Full Exterior With Reflections	6	non validato

Una sola delle combinazioni ha dunque ottenuto la validazione ed è illustrata in dettaglio nei paragrafi successivi del presente rapporto, steso in conformità alle richieste della norma. Per tutti i set sono invece sintetizzati di seguito i risultati ottenuti e l'assegnazione della classe di accuratezza per ogni test.²²

²² Le tabelle, come altre delle informazioni che seguono, sono in inglese per coerenza con le voci della norma

Test Set 1
 Time steps 1
 Solar Distribution FullExterior
 External surfaces Outdoors

Test	Q_H	Q_C	Q_{tot}
	kWh	kWh	kWh

rQ_H	rQ_C	Level
--------	--------	-------

informative

reference	1	605,5	117,2	722,7
change inertia	2	601,4	107,7	709,1
no internal gain	3	1267,3	4,8	1272,1
no solar protection	4	391,3	1162,2	1553,5

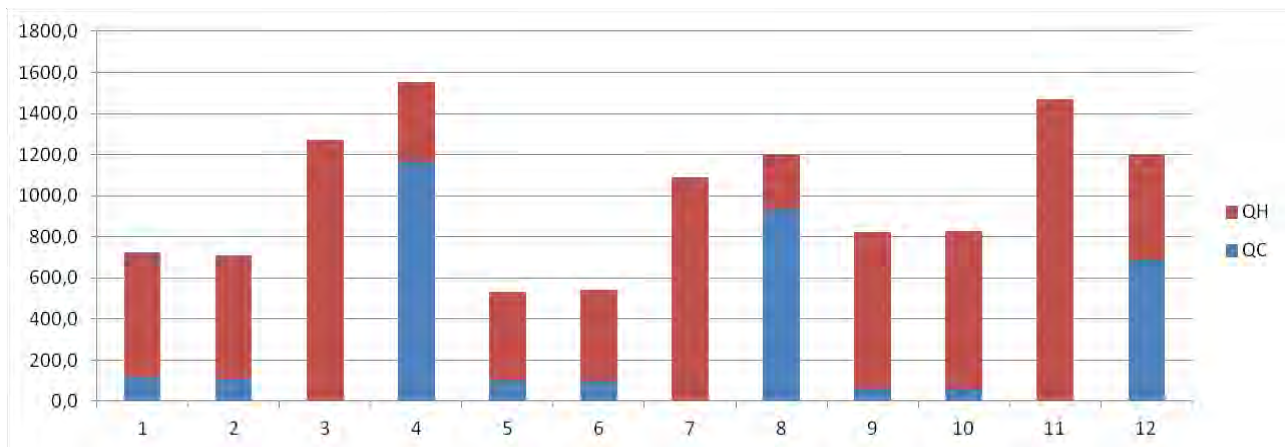
0,145	0,119	C
0,131	0,101	C
0,072	0,027	B
0,084	0,176	out of range

normative

reference	5	428,9	102,7	531,7
change inertia	6	445,0	98,3	543,3
no internal gain	7	1090,7	0,2	1090,9
no solar protection	8	262,4	936,3	1198,8
reference	9	763,2	59,0	822,2
change inertia	10	769,4	60,8	830,2
no internal gain	11	1468,3	0,0	1468,3
no solar protection	12	504,6	692,7	1197,2

0,051	0,149	C
0,093	0,125	C
0,021	0,018	A
0,035	0,136	C
0,018	0,110	C
0,255	0,172	out of range
0,052	0,010	B
0,020	0,161	out of range

not validated



Test Set 2
 Time steps 4
 Solar Distribution FullExterior
 External surfaces Outdoors

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}
	kWh	kWh	kWh

rQ _H	rQ _C	Level
-----------------	-----------------	-------

informative

reference	1	553,6	238,4	791,9
change inertia	2	549,1	229,5	778,6
no internal gain	3	1163,3	68,4	1231,7
no solar protection	4	381,9	1418,9	1800,8

0,198	0,005	out of range
0,188	0,031	out of range
0,145	0,018	C
0,088	0,053	B

0,155 0,027

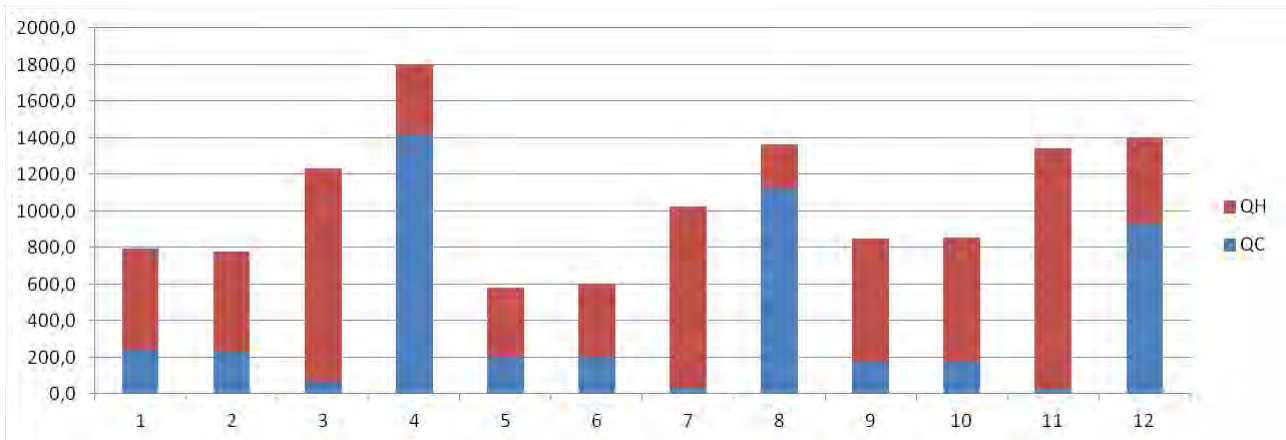
normative

reference	5	379,8	202,6	582,3
change inertia	6	399,8	202,2	602,0
no internal gain	7	991,7	32,1	1023,8
no solar protection	8	245,8	1121,2	1367,0
reference	9	672,8	174,3	847,0
change inertia	10	679,2	177,4	856,6
no internal gain	11	1316,1	26,8	1342,9
no solar protection	12	471,8	929,9	1401,6

0,125	0,001	C
0,158	0,025	out of range
0,070	0,012	B
0,047	0,008	A
0,082	0,018	B
0,137	0,020	C
0,056	0,009	B
0,042	0,001	A

0,090 0,012

not validated



Test Set 3
 Time steps 6
 Solar Distribution FullExterior
 External surfaces Outdoors

Test	Q_H	Q_C	Q_{tot}
	kWh	kWh	kWh

rQ_H	rQ_C	Level
--------	--------	-------

informative

reference	1	553,8	220,0	773,8
change inertia	2	549,1	211,0	760,1
no internal gain	3	1164,0	51,1	1215,1
no solar protection	4	382,2	1365,4	1747,6

0,198	0,014	out of range
0,188	0,011	out of range
0,145	0,006	C
0,088	0,079	B

0,155 0,028

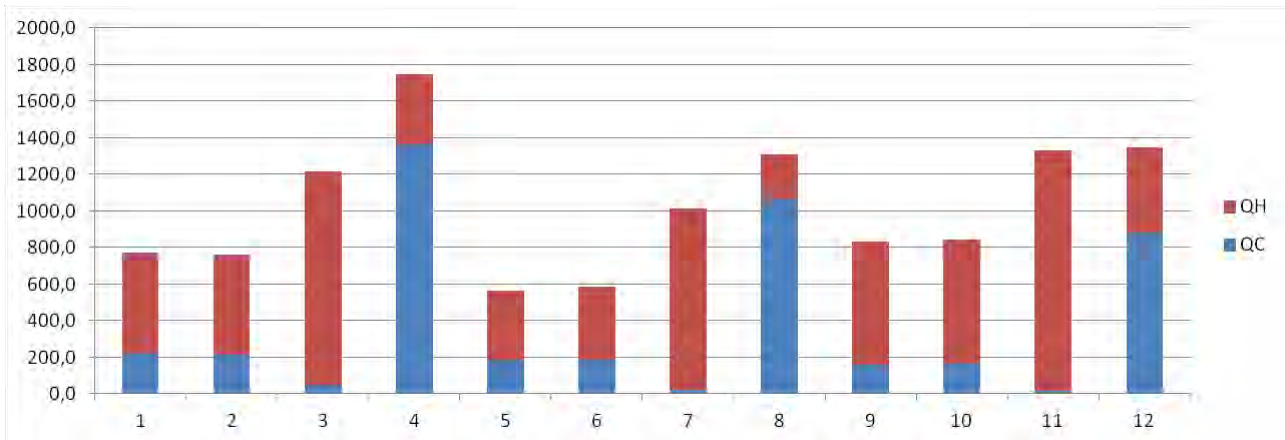
normative

reference	5	377,9	188,5	566,4
change inertia	6	398,5	187,3	585,8
no internal gain	7	990,5	20,6	1011,1
no solar protection	8	244,6	1066,9	1311,5
reference	9	670,8	161,3	832,0
change inertia	10	677,2	164,3	841,5
no internal gain	11	1314,4	16,4	1330,8
no solar protection	12	470,4	879,5	1349,9

0,128	0,020	C
0,160	0,003	out of range
0,071	0,001	B
0,047	0,046	A
0,084	0,003	B
0,134	0,037	C
0,057	0,002	B
0,043	0,033	A

0,091 0,018

not validated



Test Set 4
 Time steps 1
 Solar Distribution FullExteriorWithReflection
 External surfaces Outdoors

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}	rQ _H	rQ _C	Level
	kWh	kWh	kWh			

informative

reference	1	615,9	109,1	725,0	0,135	0,127	C
change inertia	2	611,9	99,6	711,5	0,120	0,109	C
no internal gain	3	1285,7	3,8	1289,6	0,059	0,028	B
no solar protection	4	400,7	1089,0	1489,7	0,079	0,211	out of range

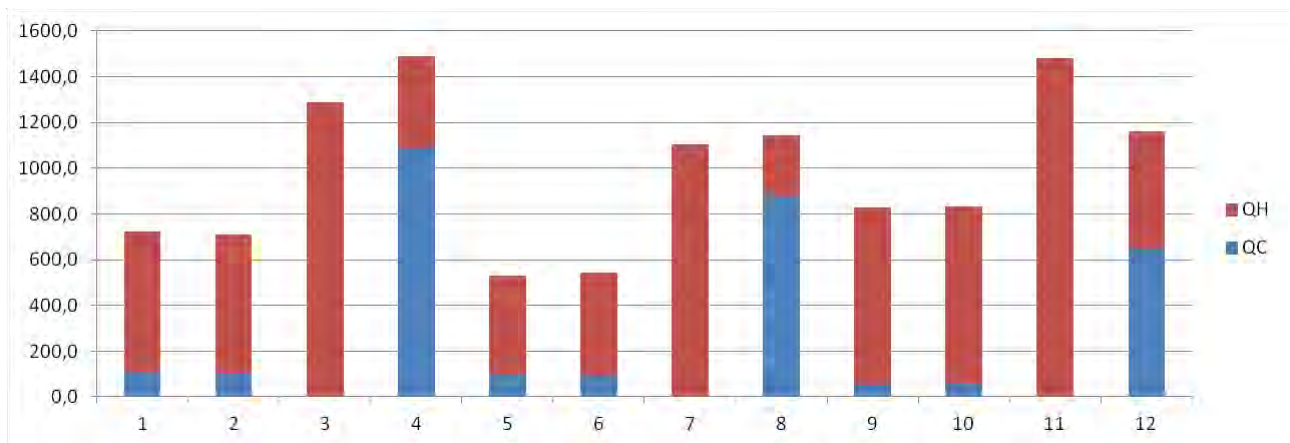
0,098 0,119

normative

reference	5	436,9	95,4	532,3	0,039	0,160	out of range
change inertia	6	453,4	90,7	544,1	0,081	0,136	C
no internal gain	7	1106,6	0,1	1106,7	0,036	0,018	A
no solar protection	8	269,5	875,5	1145,1	0,030	0,178	out of range
reference	9	772,8	53,8	826,6	0,028	0,115	C
change inertia	10	779,0	55,6	834,6	0,267	0,179	out of range
no internal gain	11	1483,6	0,0	1483,6	0,063	0,010	B
no solar protection	12	515,2	647,6	1162,8	0,013	0,192	out of range

0,070 0,123

not validated



Test Set 5
 Time steps 4
 Solar Distribution FullExteriorWithReflection
 External surfaces Outdoors

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}	rQ _H	rQ _C	Level
	kWh	kWh	kWh			

informative

reference	1	561,3	229,6	791,0	0,190	0,004	out of range
change inertia	2	557,1	220,8	777,9	0,179	0,022	out of range
no internal gain	3	1176,6	65,6	1242,2	0,136	0,016	C
no solar protection	4	390,1	1354,7	1744,8	0,084	0,084	B

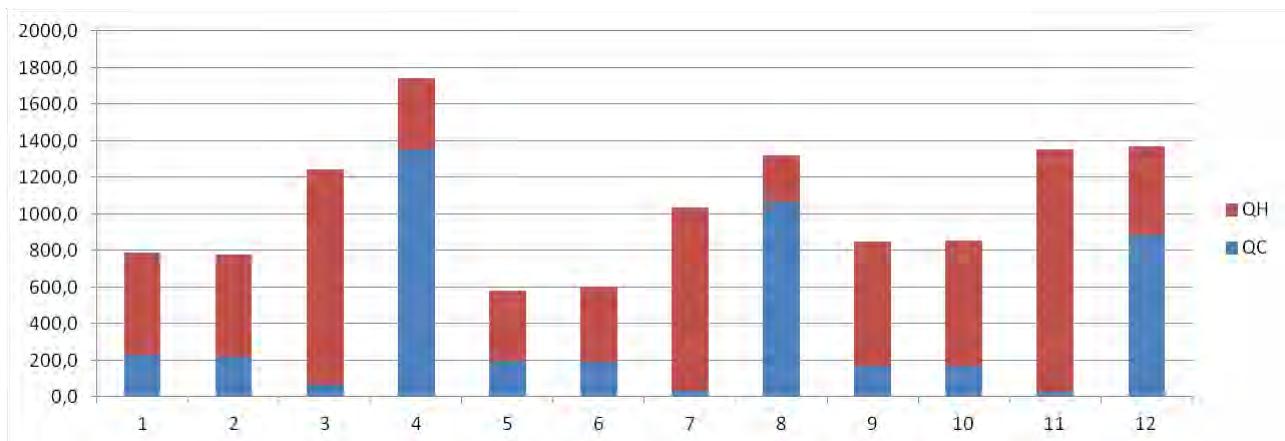
0,147 0,032

normative

reference	5	385,4	194,8	580,2	0,117	0,010	C
change inertia	6	406,1	194,4	600,5	0,149	0,013	C
no internal gain	7	1003,4	30,3	1033,7	0,059	0,010	B
no solar protection	8	251,9	1068,8	1320,7	0,042	0,045	A
reference	9	679,9	167,9	847,8	0,074	0,011	B
change inertia	10	686,3	171,0	857,3	0,146	0,028	C
no internal gain	11	1326,8	25,3	1352,0	0,048	0,008	A
no solar protection	12	480,6	888,6	1369,2	0,036	0,027	A

0,084 0,019

validated



Test Set 6
 Time steps 6
 Solar Distribution FullExteriorWithReflection
 External surfaces Outdoors

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}	rQ _H	rQ _C	Level
	kWh	kWh	kWh			

informative

reference	1	561,4	211,5	772,9	0,190	0,023	out of range
change inertia	2	557,0	202,5	759,5	0,180	0,002	out of range
no internal gain	3	1177,1	48,3	1225,5	0,136	0,004	C
no solar protection	4	390,3	1289,8	1680,0	0,084	0,115	C

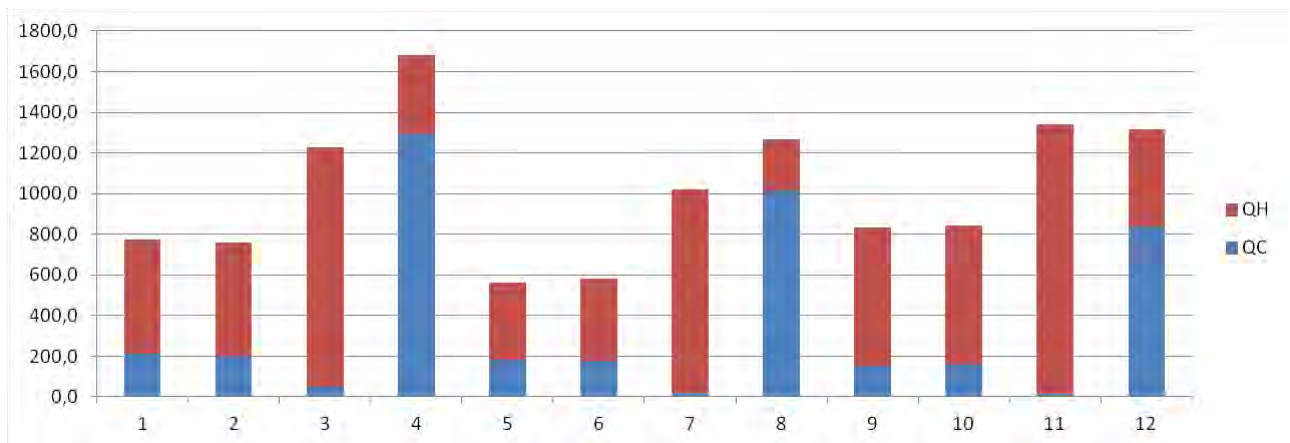
0,147 0,036

normative

reference	5	383,7	180,9	564,6	0,119	0,031	C
change inertia	6	404,6	179,7	584,3	0,151	0,008	out of range
no internal gain	7	1001,8	19,0	1020,8	0,060	0,000	B
no solar protection	8	250,6	1015,4	1265,9	0,043	0,081	B
reference	9	677,8	155,0	832,8	0,077	0,004	B
change inertia	10	684,1	158,0	842,2	0,143	0,045	C
no internal gain	11	1324,9	15,0	1339,9	0,050	0,001	A
no solar protection	12	479,1	838,9	1318,0	0,037	0,061	B

0,085 0,029

not validated



Test Set 7
 Time steps 1
 Solar Distribution FullExterior
 External surfaces OtherSideCoefficients

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}
	kWh	kWh	kWh

rQ _H	rQ _C	Level
-----------------	-----------------	-------

informative

reference	1	611,0	113,1	724,1
change inertia	2	606,9	130,4	737,3
no internal gain	3	1276,6	4,2	1280,8
no solar protection	4	392,7	1152,4	1545,1

0,140	0,123	C
0,125	0,076	C
0,065	0,027	B
0,083	0,180	out of range

0,103 0,102

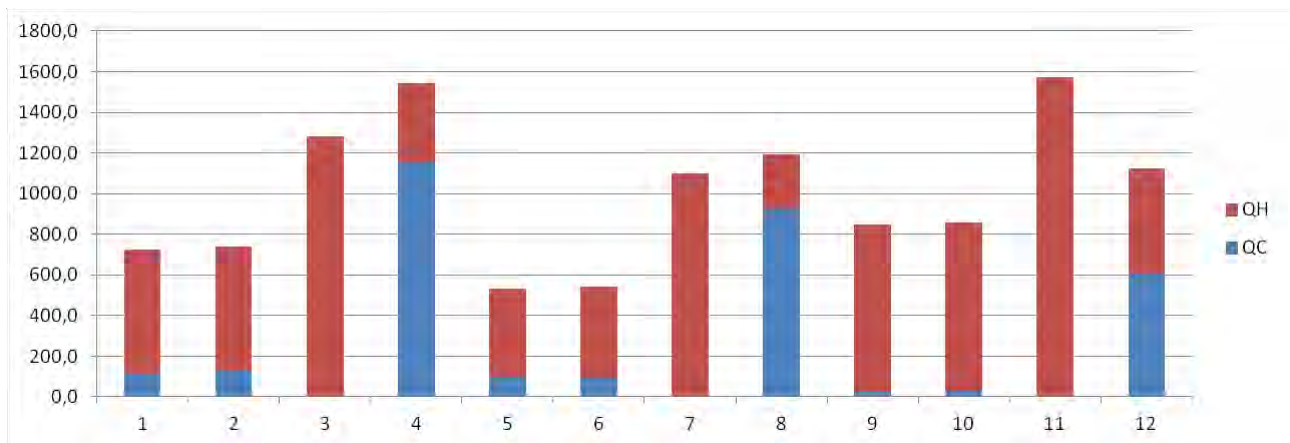
normative

reference	5	432,7	99,0	531,7
change inertia	6	448,8	94,4	543,2
no internal gain	7	1098,1	0,1	1098,2
no solar protection	8	263,3	928,3	1191,6
reference	9	822,7	26,4	849,1
change inertia	10	829,0	27,5	856,4
no internal gain	11	1571,1	0,0	1571,1
no solar protection	12	519,9	606,3	1126,1

0,046	0,155	out of range
0,088	0,131	C
0,028	0,018	A
0,034	0,142	C
0,084	0,146	C
0,332	0,215	out of range
0,125	0,010	C
0,009	0,220	out of range

0,093 0,129

not validated



Test Set 8
 Time steps 4
 Solar Distribution FullExterior
 External surfaces OtherSideCoefficients

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}
	kWh	kWh	kWh

rQ _H	rQ _C	Level
-----------------	-----------------	-------

informative

reference	1	560,5	228,7	789,3
change inertia	2	556,1	219,6	775,7
no internal gain	3	1174,9	64,0	1238,9
no solar protection	4	384,4	1402,2	1786,6

0,191	0,005	out of range
0,180	0,021	out of range
0,137	0,015	C
0,087	0,061	B

0,149 0,026

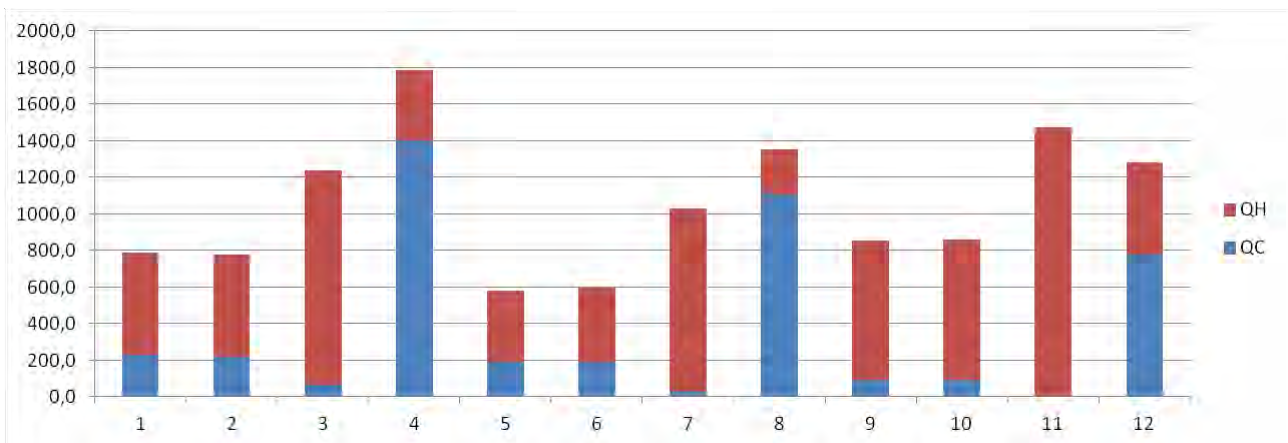
normative

reference	5	384,4	194,1	578,5
change inertia	6	404,8	193,5	598,3
no internal gain	7	1001,0	29,0	1030,0
no solar protection	8	247,5	1108,2	1355,6
reference	9	762,3	90,5	852,7
change inertia	10	768,5	92,9	861,4
no internal gain	11	1465,7	7,2	1472,9
no solar protection	12	505,1	776,1	1281,2

0,118	0,011	C
0,151	0,012	out of range
0,061	0,009	B
0,045	0,017	A
0,017	0,075	B
0,253	0,130	out of range
0,050	0,005	B
0,019	0,104	C

0,089 0,045

not validated



Test Set 9
 Time steps 6
 Solar Distribution FullExterior
 External surfaces OtherSideCoefficients

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}
	kWh	kWh	kWh

rQ _H	rQ _C	Level
-----------------	-----------------	-------

informative

reference	1	560,8	210,9	771,7
change inertia	2	556,1	201,7	757,8
no internal gain	3	1175,7	47,2	1222,9
no solar protection	4			0,0

0,191	0,023	out of range
0,180	0,001	out of range
0,137	0,003	C
0,270	0,730	out of range

0,195 0,189

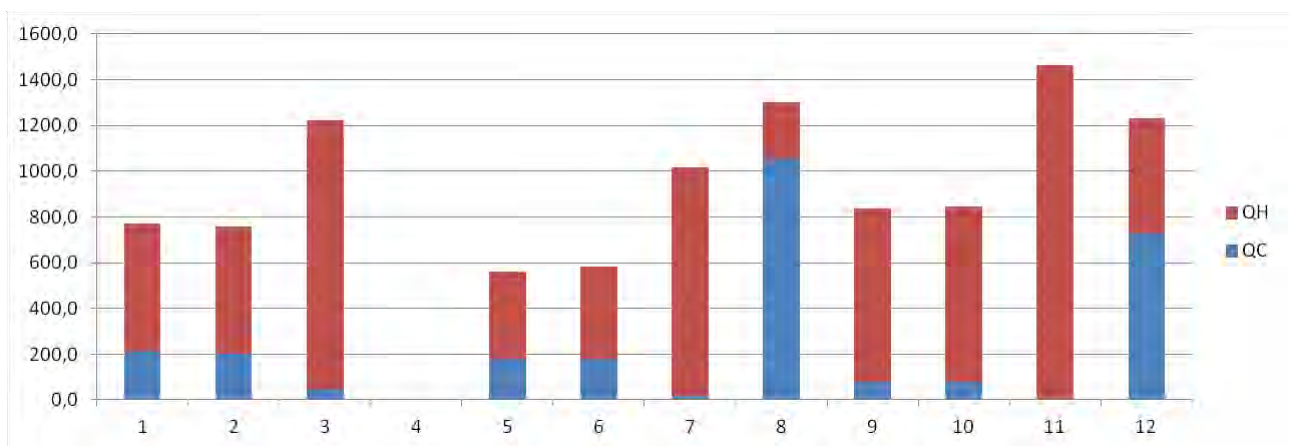
normative

reference	5	382,5	180,6	563,1
change inertia	6	403,4	179,1	582,5
no internal gain	7	999,8	18,1	1017,9
no solar protection	8	246,2	1054,4	1300,6
reference	9	760,4	78,5	838,9
change inertia	10	766,4	80,8	847,1
no internal gain	11	1464,0	1,2	1465,2
no solar protection	12	503,7	726,5	1230,2

0,121	0,032	C
0,153	0,009	out of range
0,062	0,001	B
0,046	0,055	B
0,015	0,088	B
0,251	0,146	out of range
0,049	0,009	A
0,020	0,138	C

0,090 0,060

not validated



Test Set 10
 Time steps 1
 Solar Distribution FullExteriorWithReflection
 External surfaces OtherSideCoefficients

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}	rQ _H	rQ _C	Level
	kWh	kWh	kWh			

informative

reference	1	620,0	106,0	725,9	0,130	0,130	C
change inertia	2	616,0	96,4	712,3	0,116	0,113	C
no internal gain	3	1292,5	3,5	1296,0	0,054	0,028	B
no solar protection	4	400,6	1086,3	1486,9	0,079	0,212	out of range

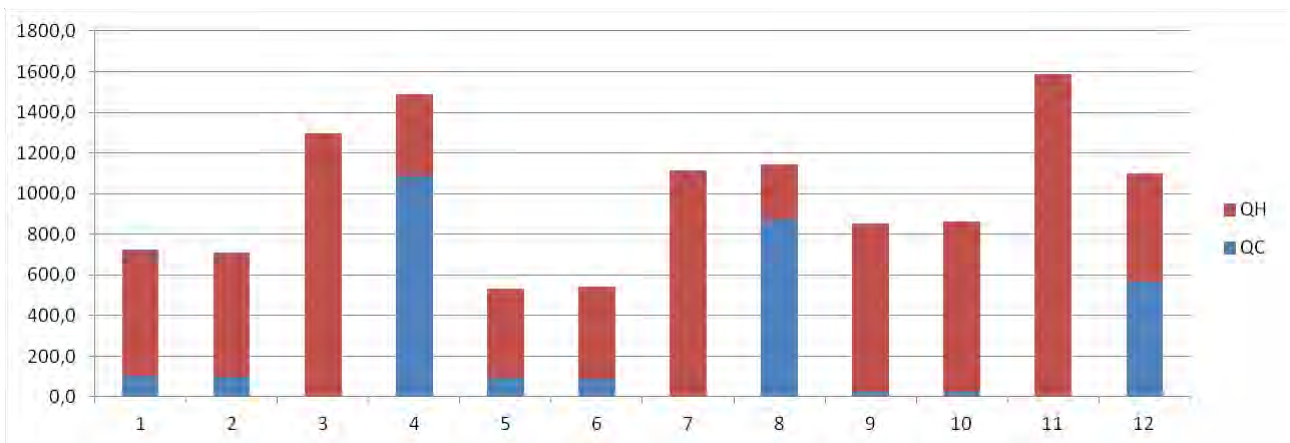
0,095 0,121

normative

reference	5	439,7	93,6	533,3	0,035	0,163	out of range
change inertia	6	456,3	87,7	544,0	0,077	0,140	C
no internal gain	7	1112,0	0,0	1112,0	0,041	0,018	A
no solar protection	8	269,3	873,6	1142,9	0,030	0,179	out of range
reference	9	831,6	23,4	855,0	0,093	0,149	C
change inertia	10	837,9	24,4	862,2	0,344	0,219	out of range
no internal gain	11	1586,1	0,0	1586,1	0,136	0,010	C
no solar protection	12	530,3	567,2	1097,5	0,002	0,247	out of range

0,095 0,141

not validated



Test Set 11
 Time steps 4
 Solar Distribution FullExteriorWithReflection
 External surfaces OtherSideCoefficients

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}	rQ _H	rQ _C	Level
	kWh	kWh	kWh			

informative

reference	1	567,1	221,3	788,4	0,184	0,013	out of range
change inertia	2	562,9	212,2	775,1	0,173	0,013	out of range
no internal gain	3	1186,4	61,6	1248,0	0,129	0,013	C
no solar protection	4	391,2	1345,4	1736,6	0,084	0,088	B

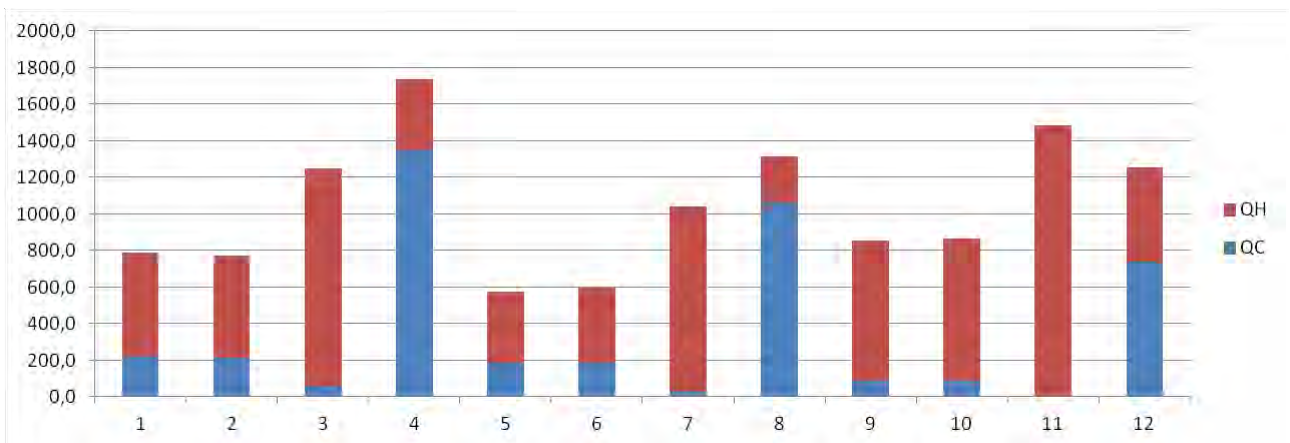
0,143 0,032

normative

reference	5	389,5	187,4	576,9	0,111	0,022	C
change inertia	6	410,2	186,8	597,0	0,143	0,002	C
no internal gain	7	1011,0	27,5	1038,5	0,052	0,007	B
no solar protection	8	252,5	1061,7	1314,2	0,042	0,049	A
reference	9	769,3	86,5	855,7	0,024	0,079	B
change inertia	10	775,4	88,9	864,4	0,263	0,135	out of range
no internal gain	11	1476,9	6,6	1483,5	0,058	0,005	B
no solar protection	12	513,9	742,3	1256,1	0,013	0,127	C

0,088 0,053

not validated



Test Set 12
 Time steps 1
 Solar Distribution FullExteriorWithReflection
 External surfaces OtherSideCoefficients

Test	Q _H	Q _C	Q _{tot}	rQ _H	rQ _C	Level
	kWh	kWh	kWh			

informative

reference	1	567,2	203,6	770,8	0,184	0,031	out of range
change inertia	2	562,7	194,4	757,2	0,173	0,007	out of range
no internal gain	3	1187,0	44,9	1231,9	0,129	0,001	C
no solar protection	4			0,0	0,270	0,730	out of range

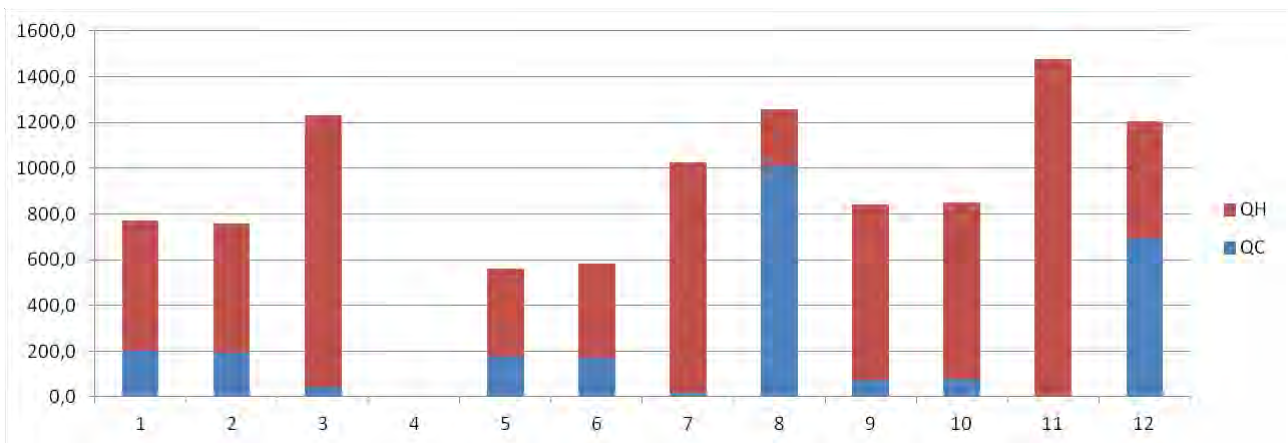
0,189 0,192

normative

reference	5	387,5	174,0	561,4	0,114	0,042	C
change inertia	6	408,7	172,5	581,2	0,145	0,018	C
no internal gain	7	1009,6	16,7	1026,3	0,053	0,003	B
no solar protection	8	251,2	1008,7	1259,8	0,043	0,086	B
reference	9	767,2	74,7	841,9	0,022	0,092	B
change inertia	10	773,3	76,9	850,2	0,260	0,151	out of range
no internal gain	11	1474,9	1,0	1475,8	0,057	0,009	B
no solar protection	12	512,3	693,2	1205,5	0,015	0,161	out of range

0,089 0,070

not validated



Dati di input

- DATI GEOMETRICI DEGLI ELEMENTI DI INVOLUCRO

La tabella seguente riassume i dati geometrici e dimensionali degli elementi dell'involucro esterno. Le superfici sono tutte di forma rettangolare, per "Lato 1" si intende la base orizzontale per le superfici verticali ed il lato maggiore per quelle orizzontali.

Elemento	Lato 1 (m)	Lato 2 (m)	Superficie (m²)	Orientamento lato esterno
Muro esterno (finestra esclusa)	1,10	2,80	3,08	verticale Ovest
Vetratura finestra	2,50	2,80	7,00	verticale Ovest
Muro interno sinistro	5,50	2,80	15,40	verticale Nord
Muro interno destro	5,50	2,80	15,40	verticale Sud
Muro interno posteriore	3,60	2,80	10,08	verticale Est
Solaio	5,50	3,60	19,80	orizzontale alto
Soffitto/tetto	5,50	3,60	19,80	orizzontale basso

- CONDIZIONI AL CONTORNO DI OGNI ELEMENTO

In tabella sono riportate delle condizioni al contorno dei diversi elementi d'involucro.

Elemento	Condizioni esterne	Condizioni interne
Muro esterno (finestra esclusa)	ambiente esterno	ambiente interno climatizzato
Vetratura finestra	ambiente esterno	ambiente interno climatizzato
Muro interno sinistro	adiabatiche	ambiente interno climatizzato
Muro interno destro	adiabatiche	ambiente interno climatizzato
Muro interno posteriore	adiabatiche	ambiente interno climatizzato
Pavimento	adiabatiche	ambiente interno climatizzato
Soffitto (test 1-8)	adiabatiche	ambiente interno climatizzato
Tetto (test 9-12)	ambiente esterno	ambiente interno climatizzato

- PROPRIETÀ TERMICHE DEI MATERIALI

Sono di seguito riportate le stratigrafie degli elementi di involucro opachi e le proprietà termiche dei relativi materiali. I nomi di stratigrafie e materiali sono mantenuti in inglese, come indicati dal testo della norma.

I simboli utilizzati in tabella indicano:

d	spessore
λ	conduttività termica
ρ	massa volumica
c_p	calore specifico

Stratigrafia <i>Materiale</i>	d (m)	λ (W*m ⁻¹ *K ⁻¹)	ρ (kg*m ⁻³)	c_p (kJ*kg ⁻¹ *K ⁻¹)
Type 1 (muro esterno)				
<i>outer layer</i>	0,115	0,99	1.800	0,85
<i>insulating layer</i>	0,06	0,04	30	0,85
<i>masonry</i>	0,175	0,79	1.600	0,85
<i>internal plastering</i>	0,015	0,70	1.400	0,85
Type 2 (muro interno)				
<i>gypsum plaster</i>	0,012	0,21	900	0,85
<i>mineral wool</i>	0,10	0,04	30	0,85
<i>gypsum plaster</i>	0,01	0,21	900	0,85
Type 3c (soffitto)				
<i>plastic covering</i>	0,004	0,23	1.500	1,5
<i>cement floor</i>	0,06	1,40	2.000	0,85
<i>mineral wool</i>	0,04	0,04	50	0,85
<i>concrete</i>	0,18	2,10	2.400	0,85
Type 3f (pavimento)				
<i>concrete</i>	0,18	2,10	2.400	0,85
<i>mineral wool</i>	0,04	0,04	50	0,85
<i>cement floor</i>	0,06	1,40	2.000	0,85
<i>plastic covering</i>	0,004	0,23	1.500	1,5
Type 4c (soffitto)				
<i>plastic covering</i>	0,004	0,23	1.500	1,5
<i>cement floor</i>	0,06	1,40	2.000	0,85
<i>mineral wool</i>	0,04	0,04	50	0,85
<i>concrete</i>	0,18	2,10	2.400	0,85
<i>mineral wool</i>	0,10	0,04	50	0,85
<i>acoustic board</i>	0,02	0,06	400	0,85
Type 4f (pavimento)				
<i>acoustic board</i>	0,02	0,06	400	0,85
<i>mineral wool</i>	0,10	0,04	50	0,85
<i>concrete</i>	0,18	2,10	2.400	0,85
<i>mineral wool</i>	0,04	0,04	50	0,85
<i>cement floor</i>	0,06	1,40	2.000	0,85
<i>plastic covering</i>	0,004	0,23	1.500	1,5
Type 5 (tetto)				
<i>rain protection</i>	0,004	0,23	1.500	1,3
<i>insulating</i>	0,08	0,04	50	0,85
<i>concrete</i>	0,20	2,1	2.400	0,85

Le proprietà termiche dei vetri sono modellate (così come indicate dalla norma) attraverso il coefficiente di trasmittanza termica globale U del sistema di vetratura completo.

I due sistemi di vetratura utilizzati nelle simulazioni sono (di nuovo come denominate dalla norma):

- *Shaded DP* (doppio vetro con schermatura esterna) $U = 2,37 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$
- *DP* (doppio vetro senza schermatura esterna) $U = 2,93 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$

Le stratigrafie per gli elementi opachi ed i sistemi di vetratura sono utilizzati nei diversi test come riportato nella seguente tabella

Test	muro esterno	vetrata	muri adiabatici	soffitto adiabatico	pavimento adiabatico
1	Type 1	Shaded DP	Type 2	Type 4c	Type 4f
2	Type 1	Shaded DP	Type 2	Type 3c	Type 3f
3	Type 1	Shaded DP	Type 2	Type 4c	Type 4f
4	Type 1	DP	Type 2	Type 4c	Type 4f
5	Type 1	Shaded DP	Type 2	Type 4c	Type 4f
6	Type 1	Shaded DP	Type 2	Type 3c	Type 3f
7	Type 1	Shaded DP	Type 2	Type 4c	Type 4f
8	Type 1	DP	Type 2	Type 4c	Type 4f

Test	muro esterno	vetrata	muri adiabatici	tetto esterno	pavimento adiabatico
9	Type 1	Shaded DP	Type 2	Type 5	Type 4f
10	Type 1	Shaded DP	Type 2	Type 5	Type 3f
11	Type 1	Shaded DP	Type 2	Type 5	Type 4f
12	Type 1	DP	Type 2	Type 5	Type 4f

- PROPRIETÀ OTTICHE DEI MATERIALI TRASPARENTI

Le proprietà ottiche dei vetri sono modellate (così come indicate dalla norma) attraverso il fattore di trasmittanza solare totale g del sistema di vetratura completo.

I due sistemi di vetratura presentano le seguenti caratteristiche

- *Shaded DP* (doppio vetro con schermatura esterna) $g = 0,20$
- *DP* (doppio vetro senza schermatura esterna) $g = 0,77$

- PROFILI ORARI DI SCHERMATURE SOLARI, CARICHI INTERNI, VENTILAZIONE E INFILTRAZIONI

I profili orari utilizzati nei test sono i seguenti:

- schermatura solare: sempre attiva nei test 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11
sempre assente nei test 4, 8, 12
- carichi interni: 20 W/m², da lunedì a venerdì, ore 8-18 nei test 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12
sempre assenti nei test 3, 7, 11
- ventilazione: 1 volume orario, da lunedì a venerdì, ore 8-18 in tutti i test
- infiltrazioni: sempre assenti in tutti i test

Gli orari sono qui espressi in ora legale, vale a dire (come indicato dalla norma) due ore avanti rispetto all'ora solare nel periodo fra il 25 marzo ed il 20 ottobre e un'ora avanti durante il resto dell'anno. Gli input per le simulazioni sono stati compilati in maniera da correggere tale discrepanza.

- PROFILI ORARI DELLE TEMPERATURE DI SET POINT PER RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO

- Riscaldamento: 20°C, sempre attivo nei test 1, 2, 3, 4
20°C, da lunedì a venerdì, ore 8-18 nei test 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
- Raffrescamento: 26°C, sempre attivo nei test 1, 2, 3, 4
26°C, da lunedì a venerdì, ore 8-18 nei test 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

- ASSUNTI SULLA DISTRIBUZIONE SOLARE INTERNA

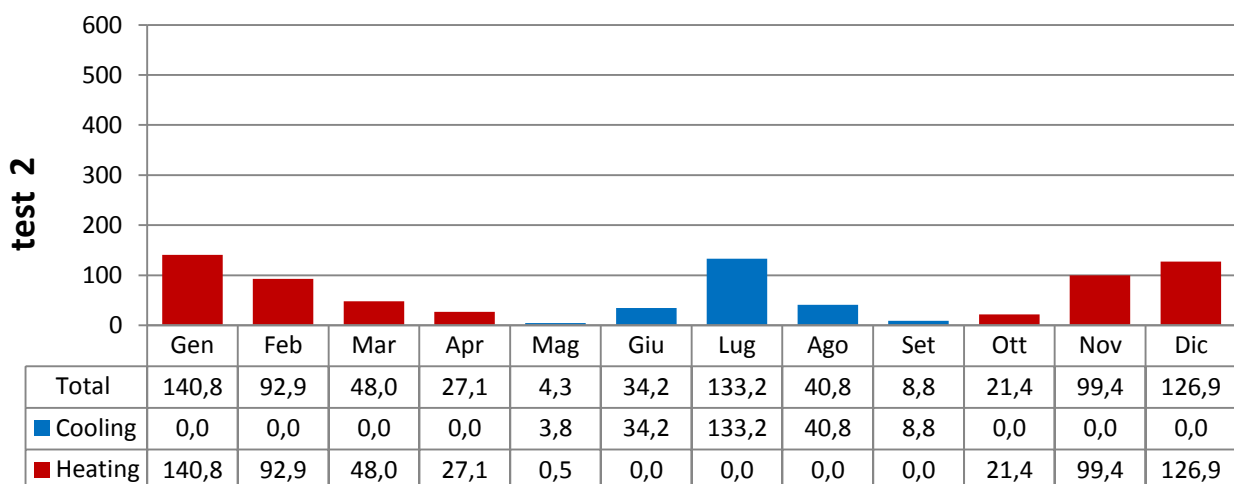
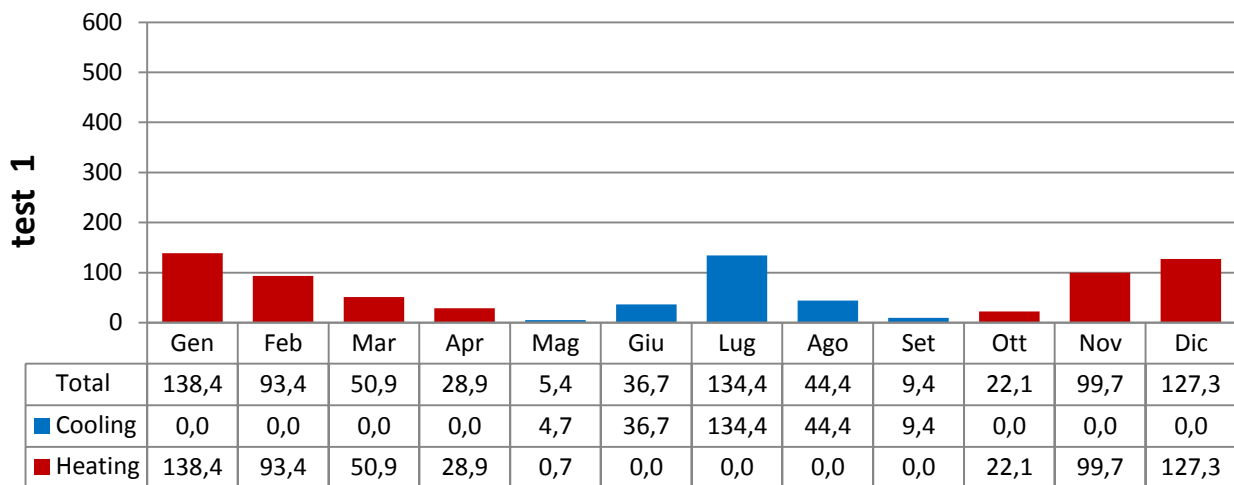
La distribuzione solare interna è stata modellata come uniformemente distribuita sulle superfici interne, conformemente alle indicazioni della norma. La diffusione totale della radiazione trasmessa, così come il trasferimento immediato all'aria del 10% della stessa energia trasmessa, sono state ottenute inserendo un componente schermante fittizio all'interno della superficie vetrata. Detto componente è descritto nel modello con un materiale totalmente diffondente, con trasmittanza solare pari a 0,9 e capacità termica pari a 0. Per non incidere sulla trasmittanza termica della vetrata, la superficie della schermatura è stata posizionata ad un metro di distanza dalla stessa e con

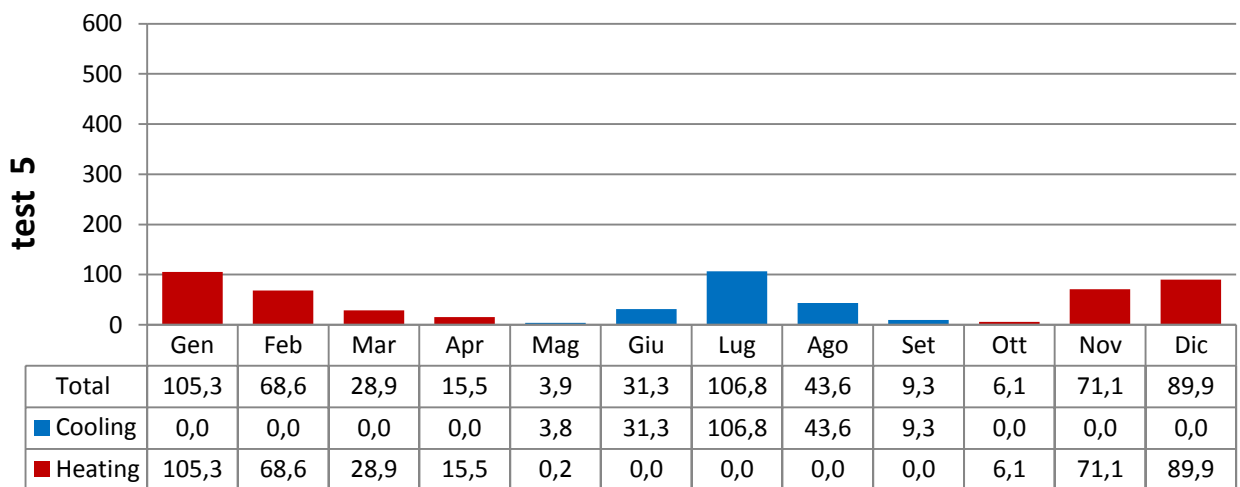
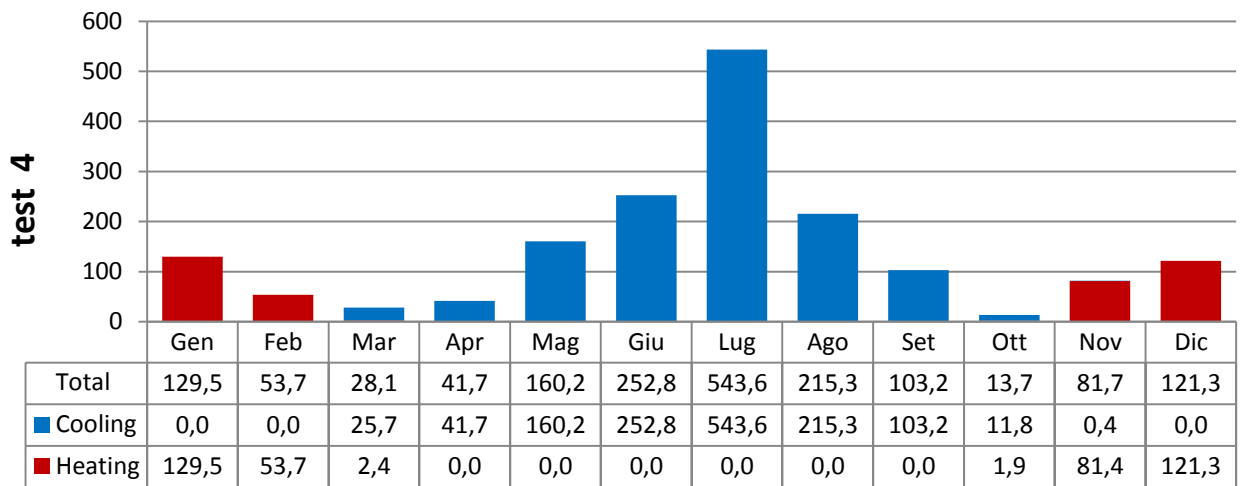
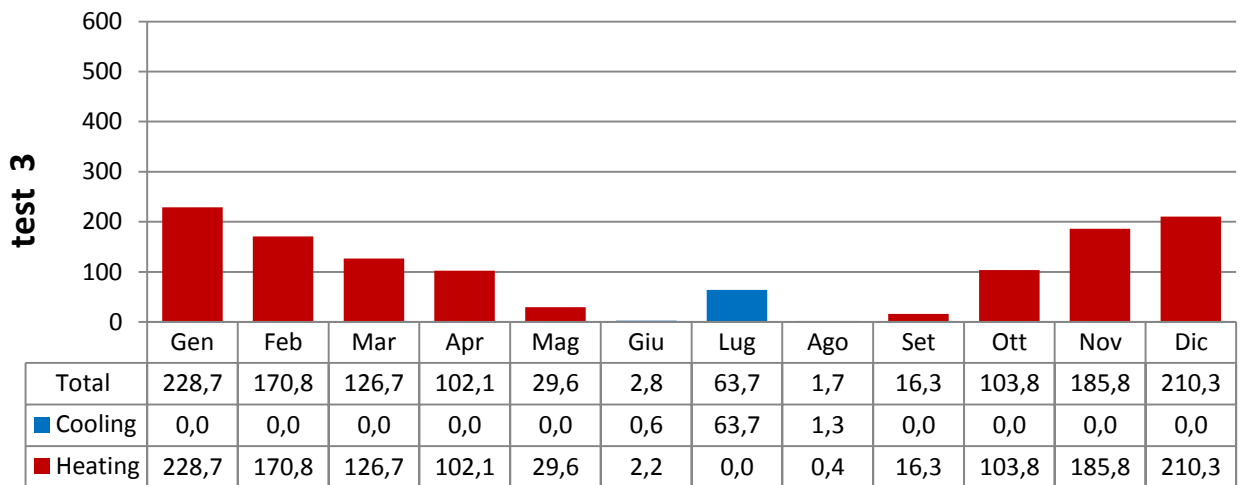
intercapedine totalmente ventilata (ciò non ha effetto sul comportamento sopra descritto rispetto alla radiazione solare).

Risultati di output

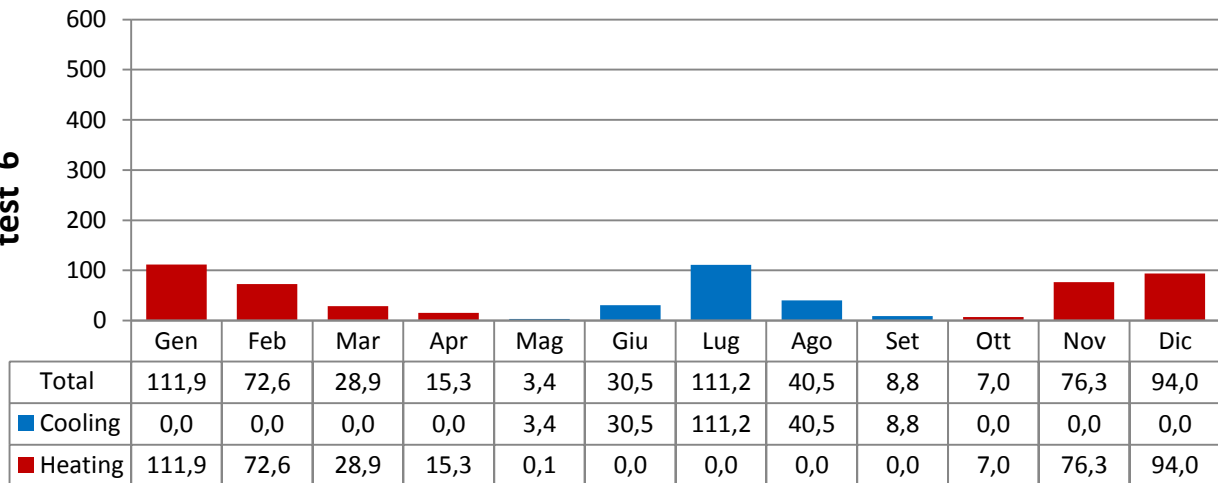
- FABBISOGNI ENERGETICI MENSILI PER RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO

Nei seguenti grafici e tabelle sono riportati, in kWh, i fabbisogni mensili di energia termica per riscaldamento e raffrescamento registrati per i 12 test di validazione.

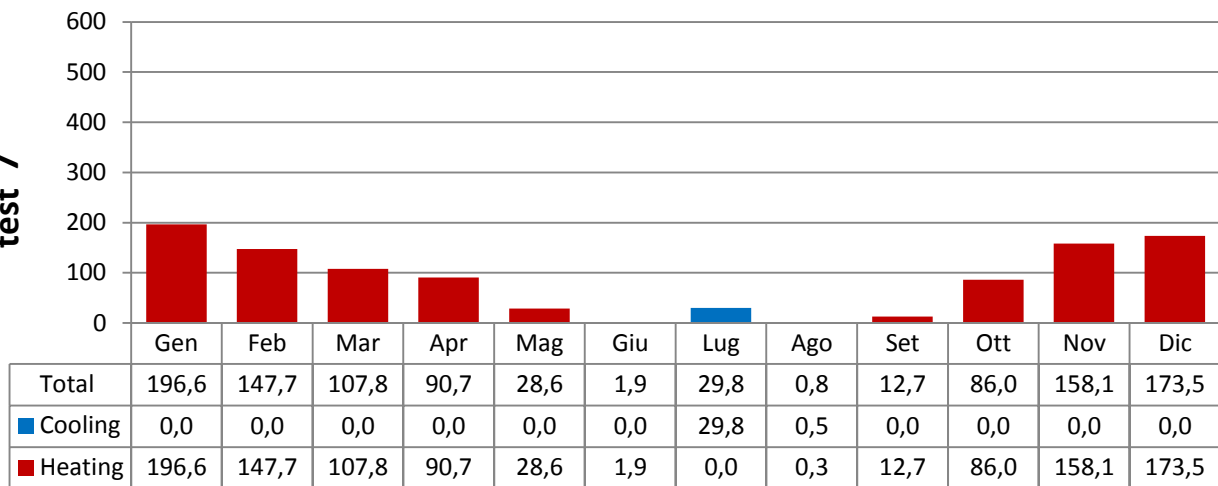




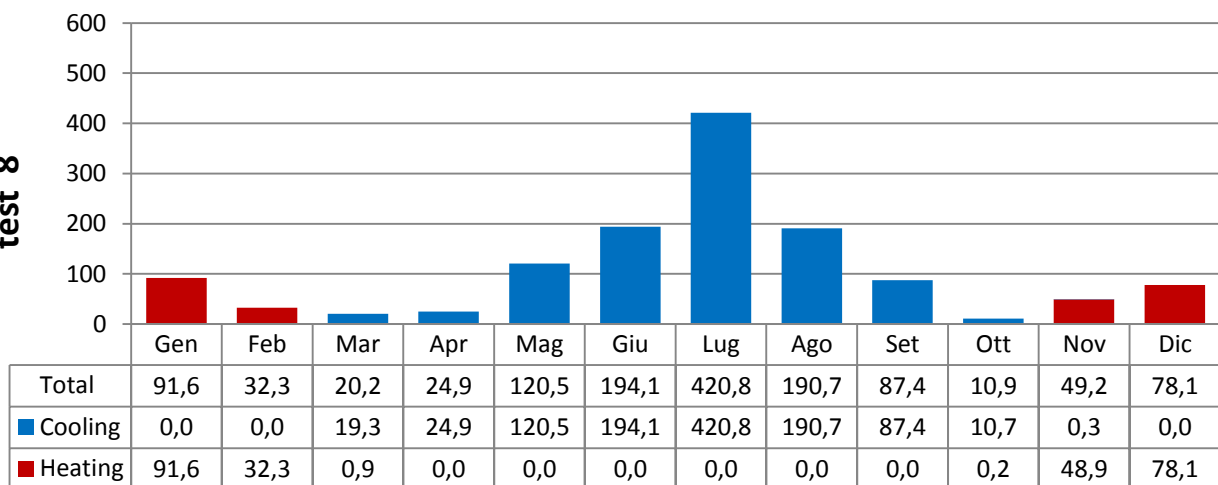
test 6

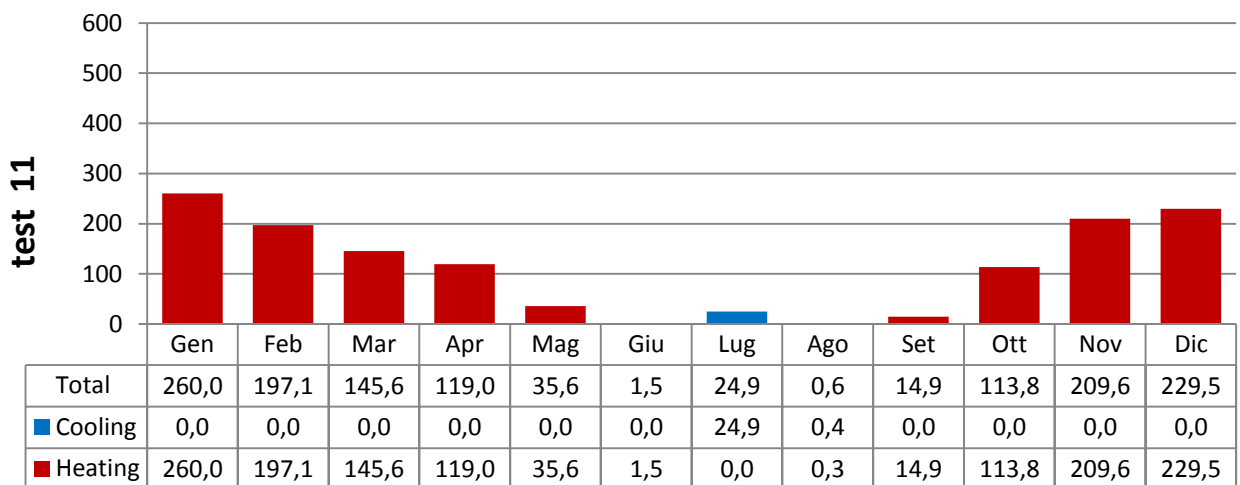
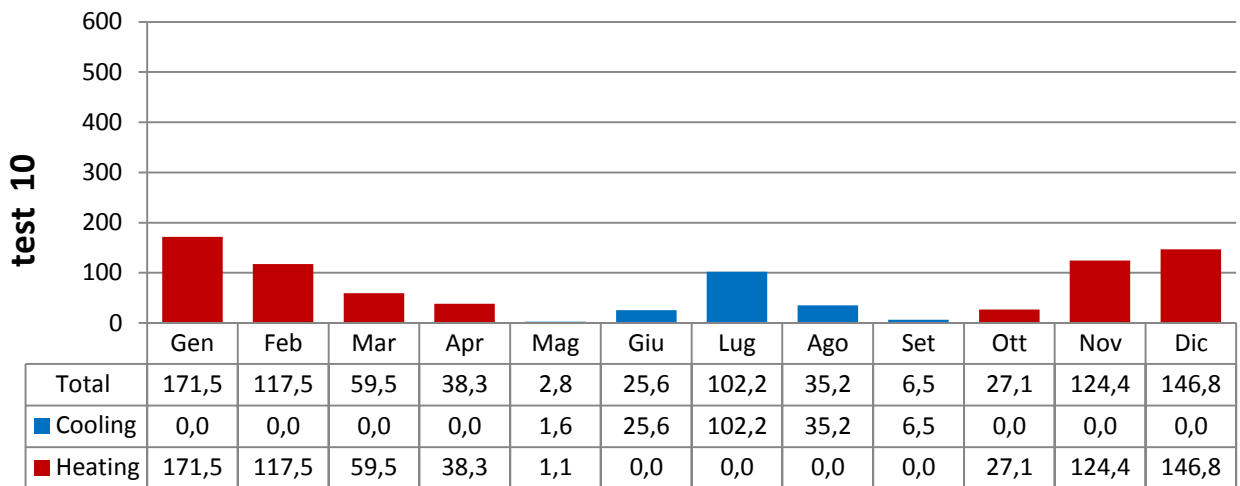
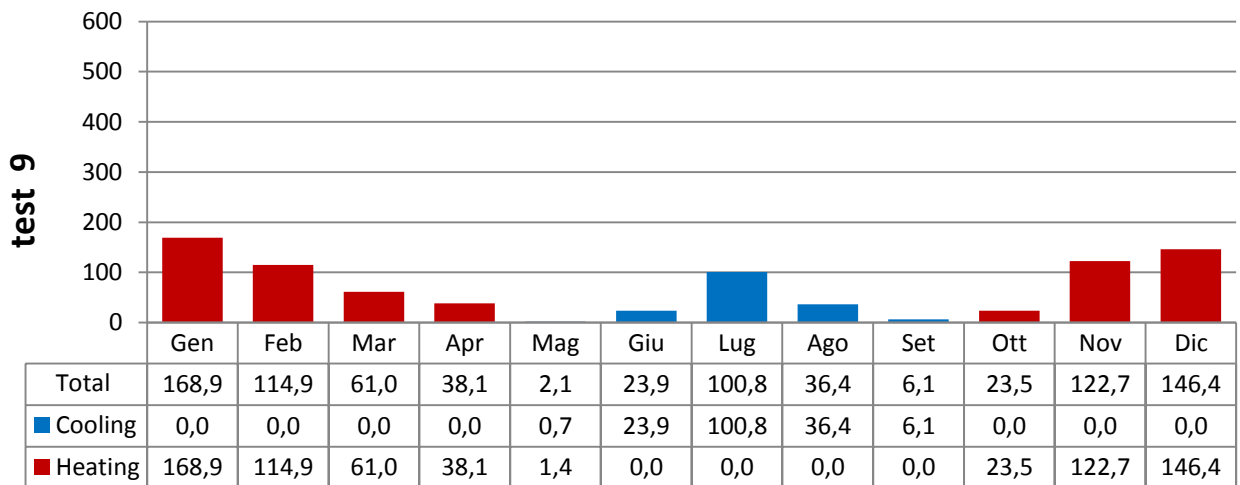


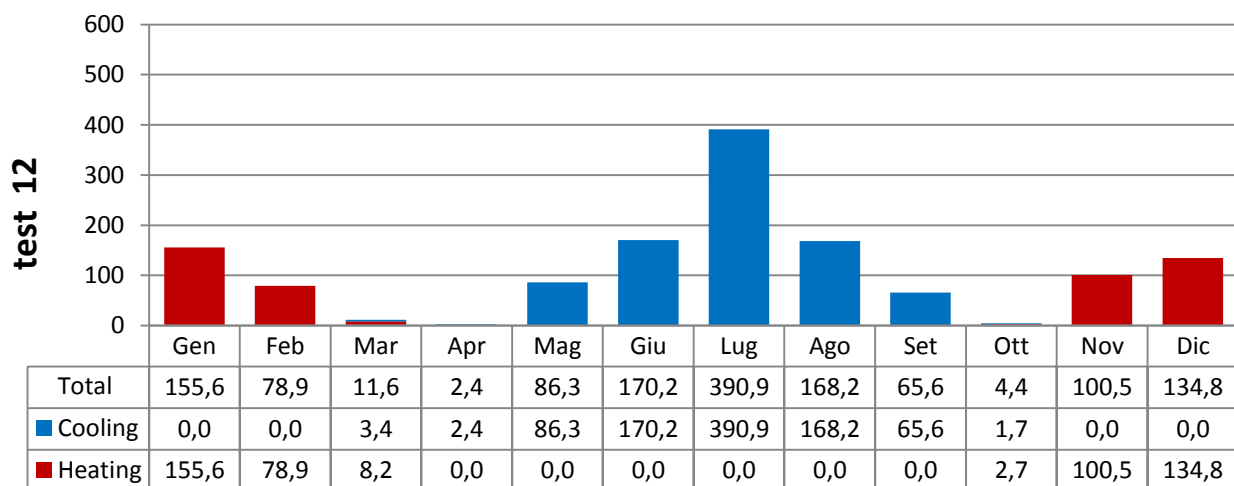
test 7



test 8

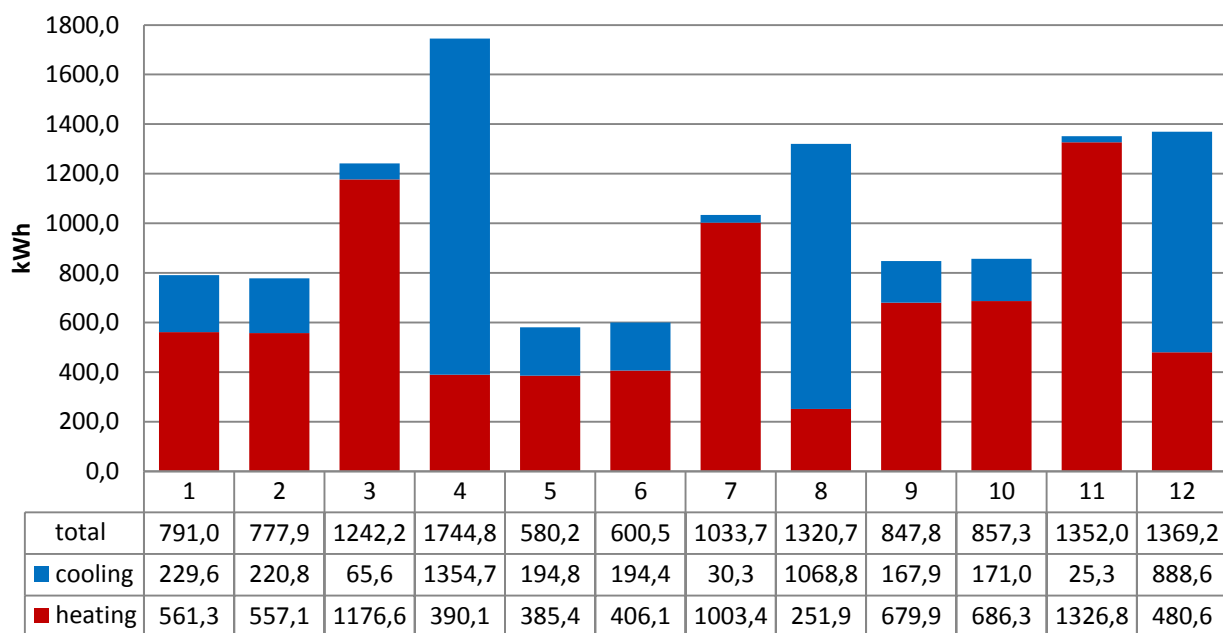






- FABBISOGNI ENERGETICI ANNUALI PER RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO

La tabella seguente riassume i fabbisogni termici annuali per riscaldamento e raffrescamento registrati nei 12 test di validazione eseguiti.

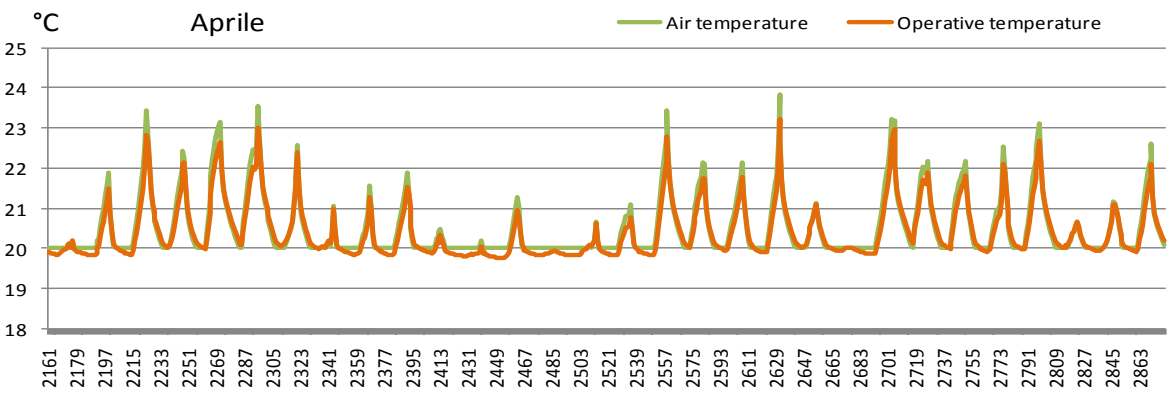
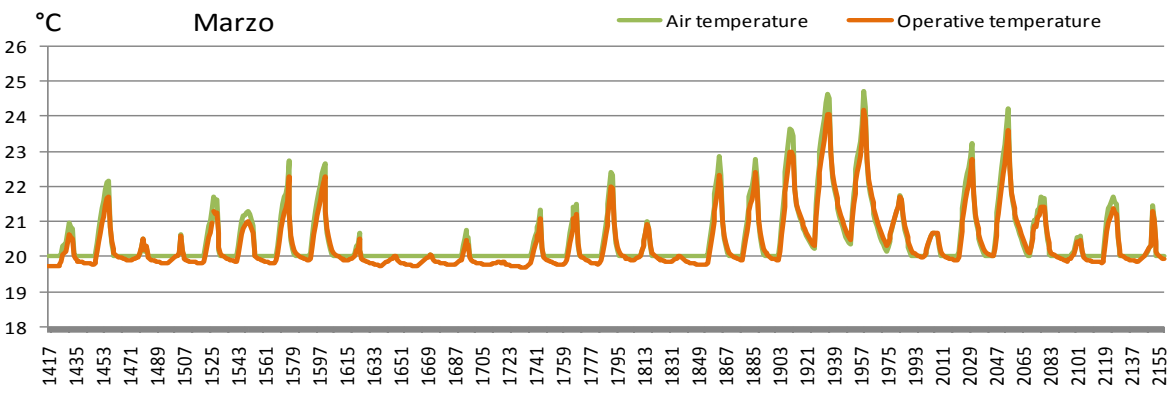
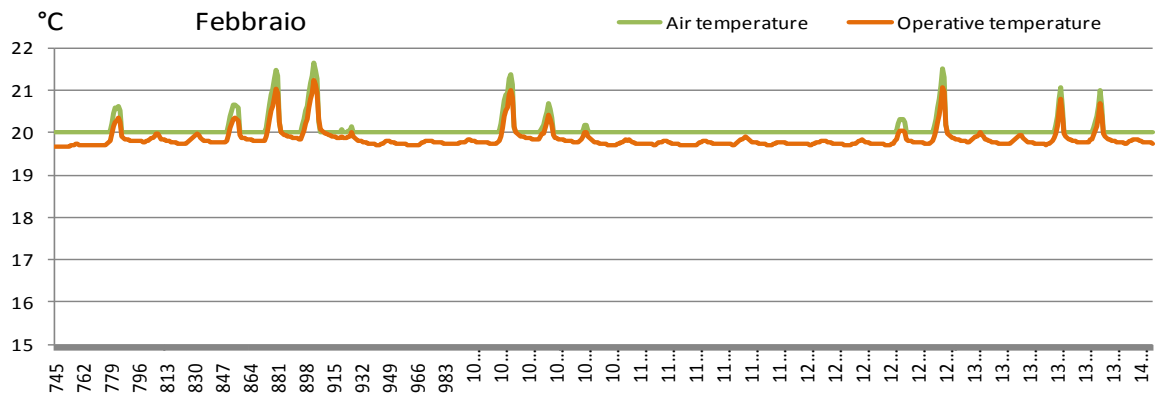
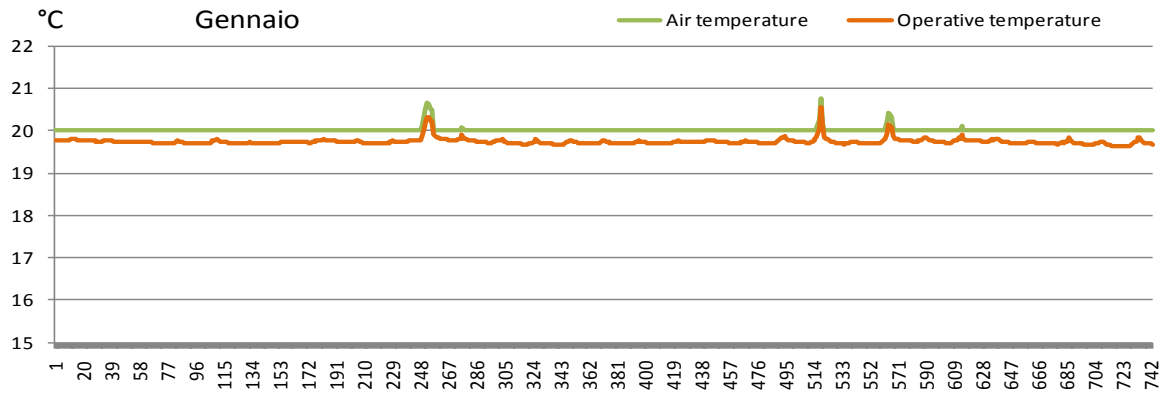


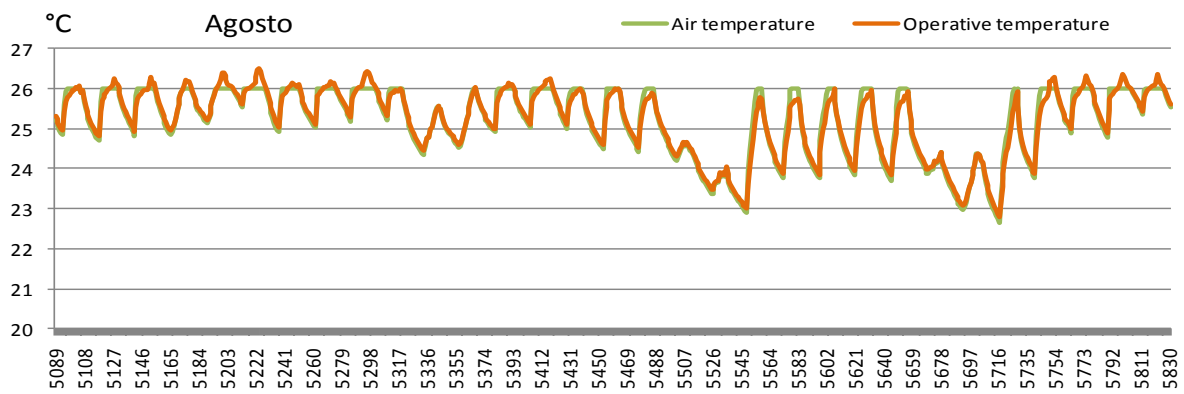
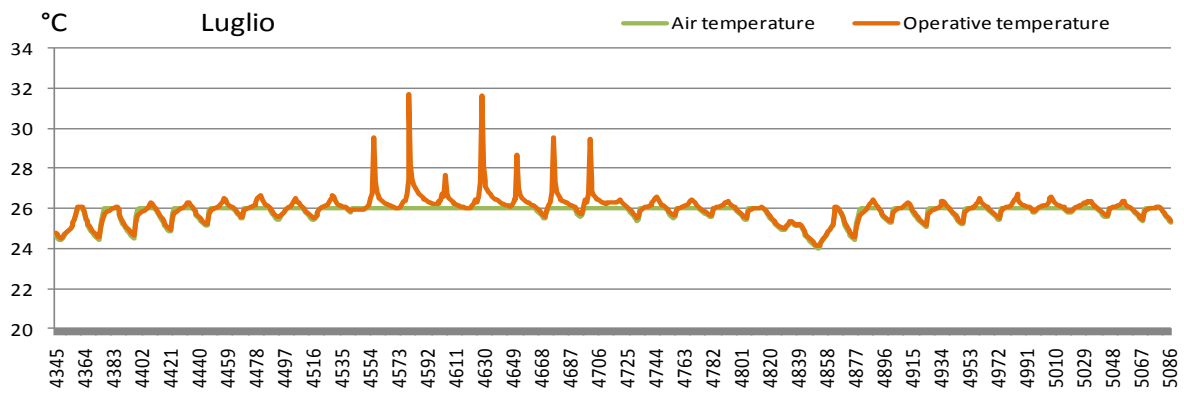
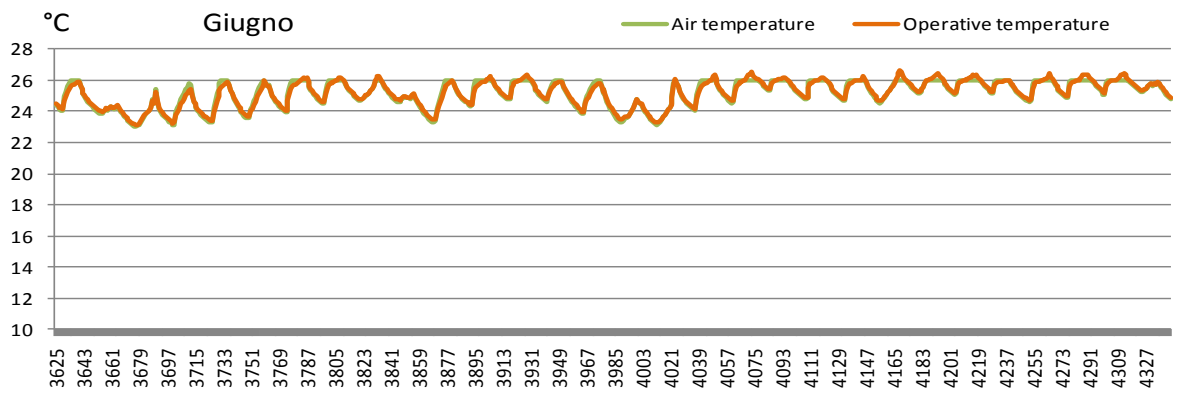
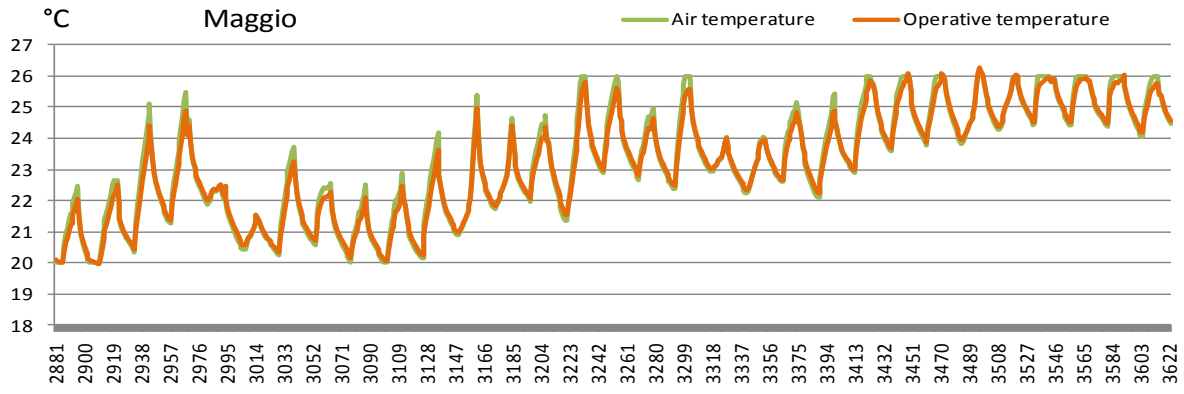
- ANDAMENTO ORARIO DELLE TEMPERATURE E DELLA RICHIESTA DI CLIMATIZZAZIONE

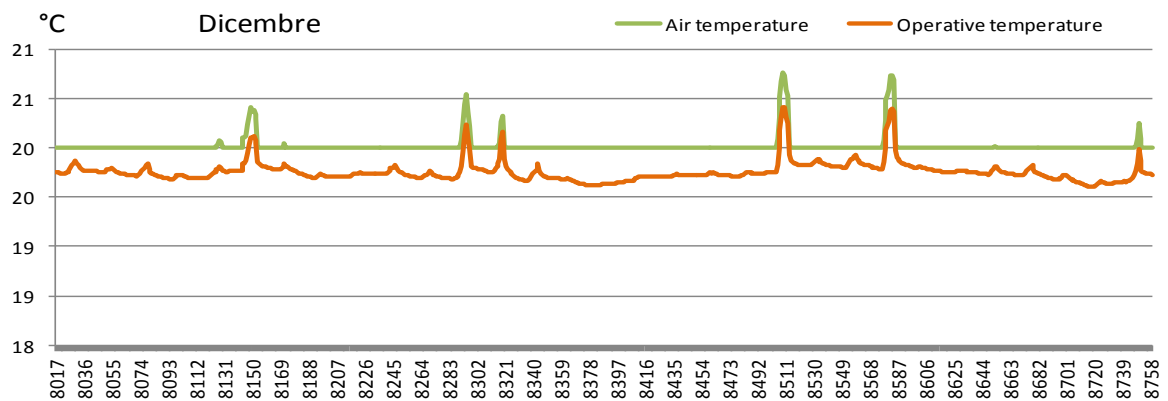
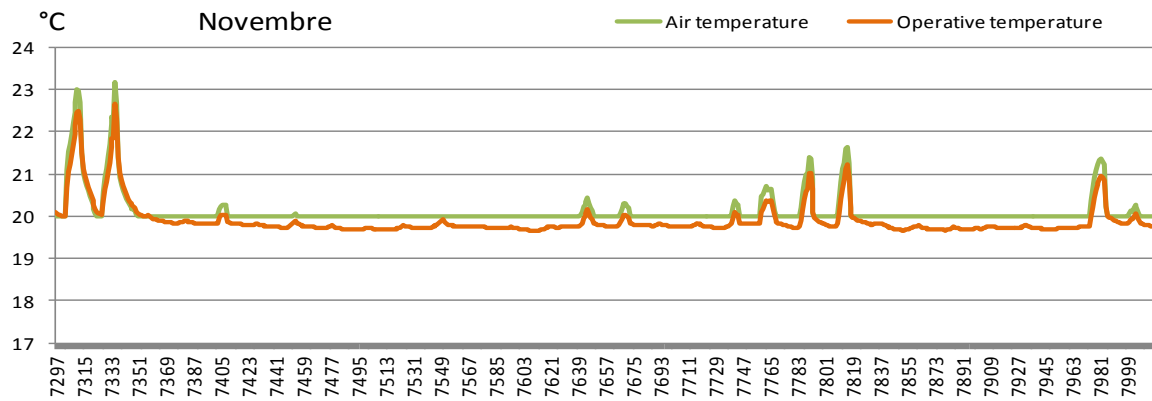
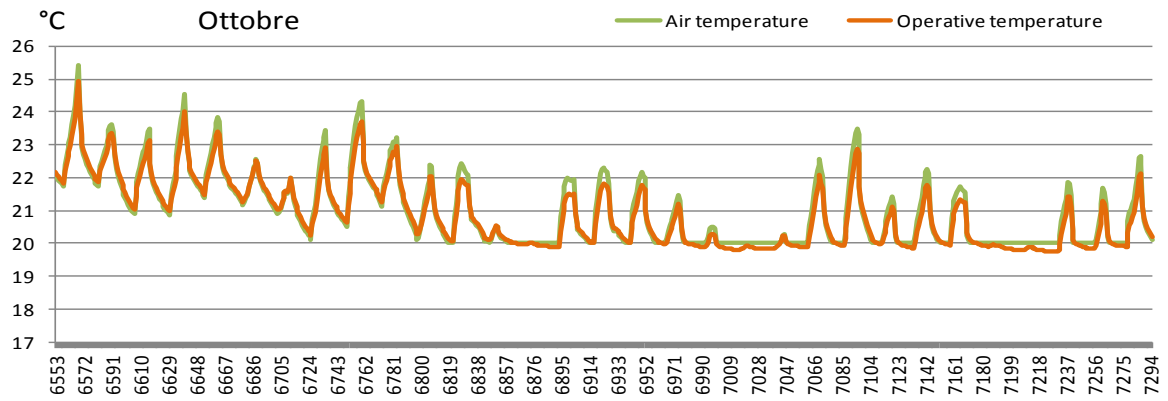
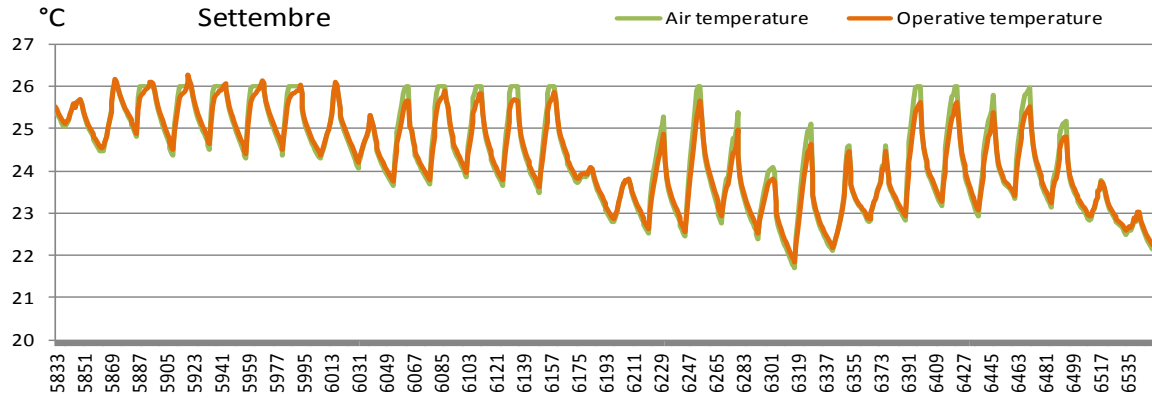
I grafici e le tabelle seguenti contengono i valori orari delle temperature dell'aria e operanti e della domanda di climatizzazione registrate durante le simulazioni.

Per ragioni di spazio vengono qui riportati solo i grafici mensili relativi al primo test, mentre tutti gli altri sono raccolti nell'Appendice B.

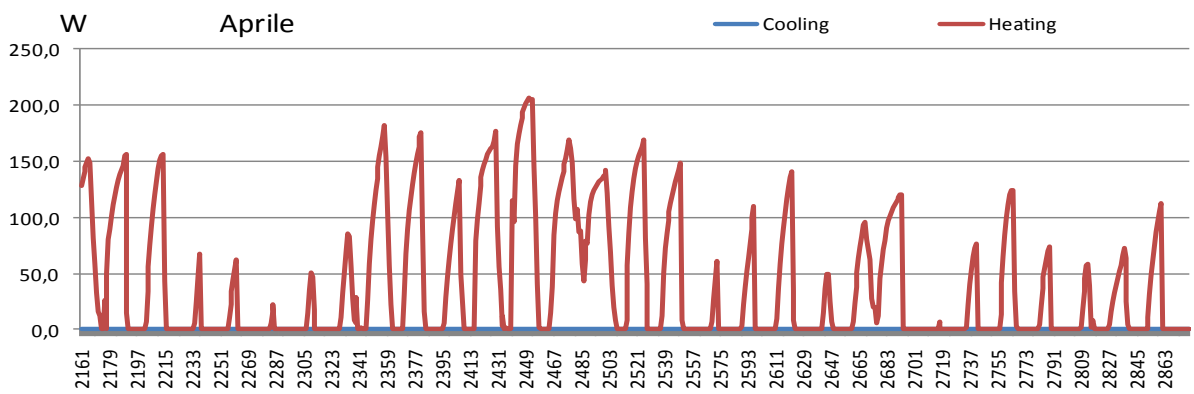
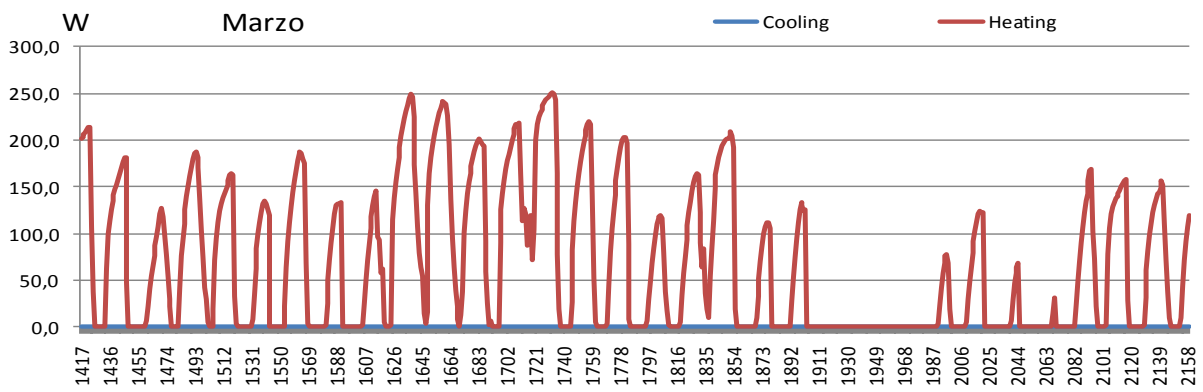
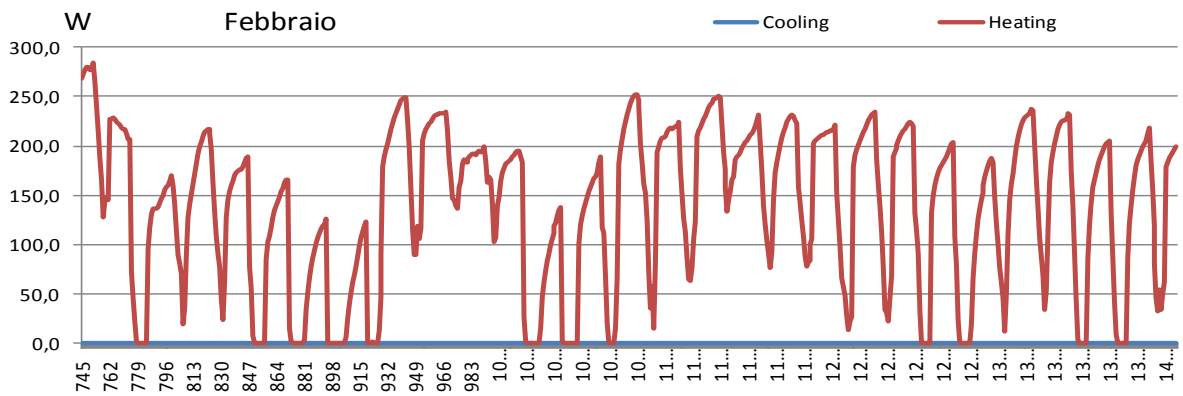
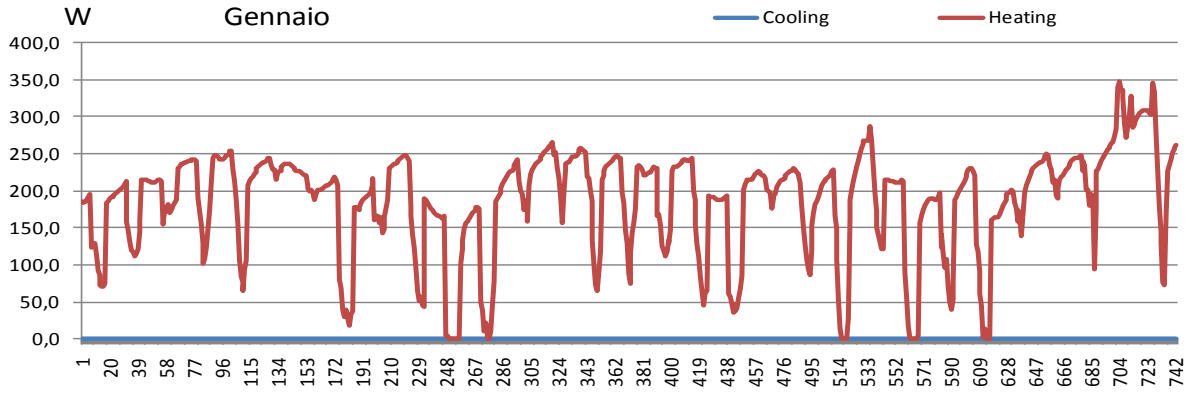
Temperature Test 1

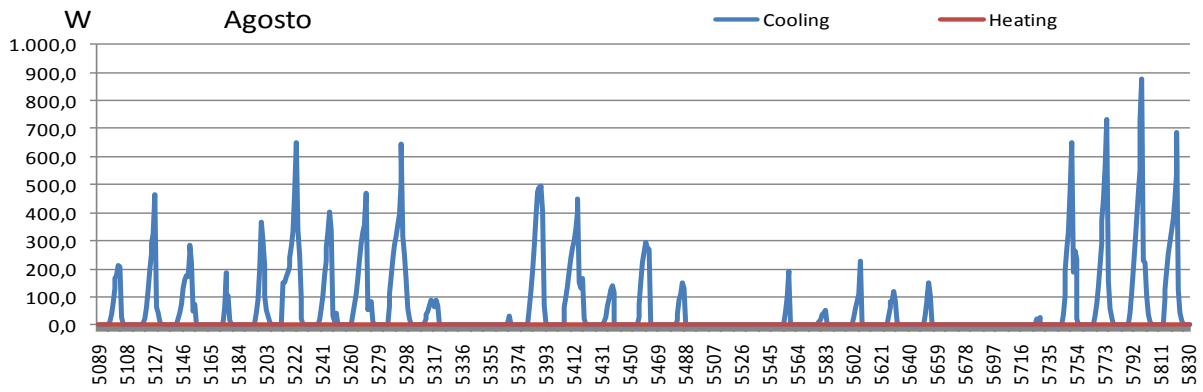
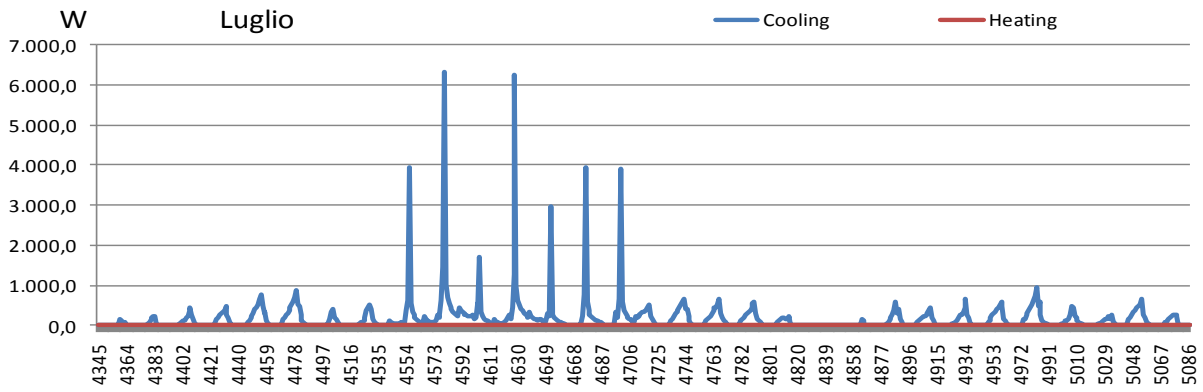
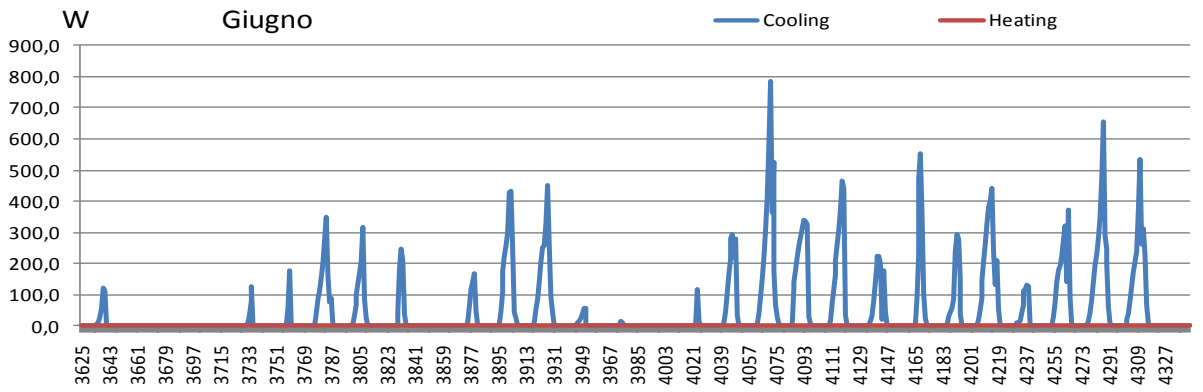
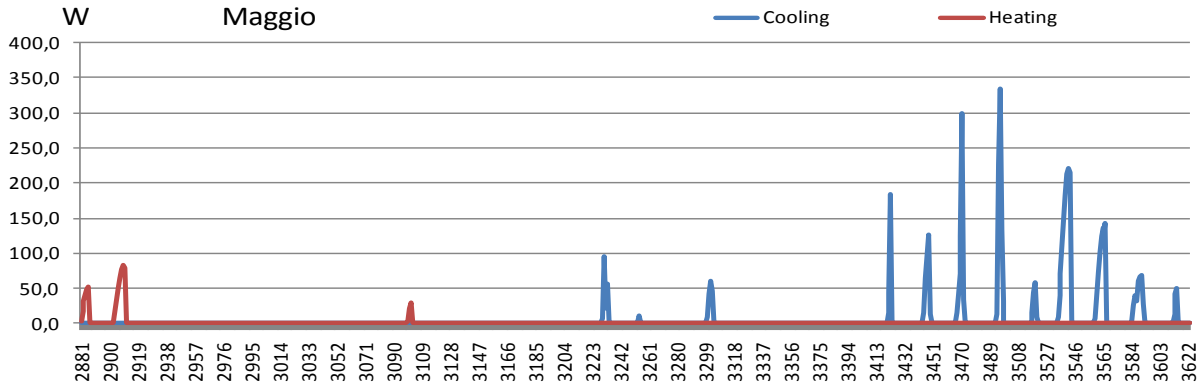


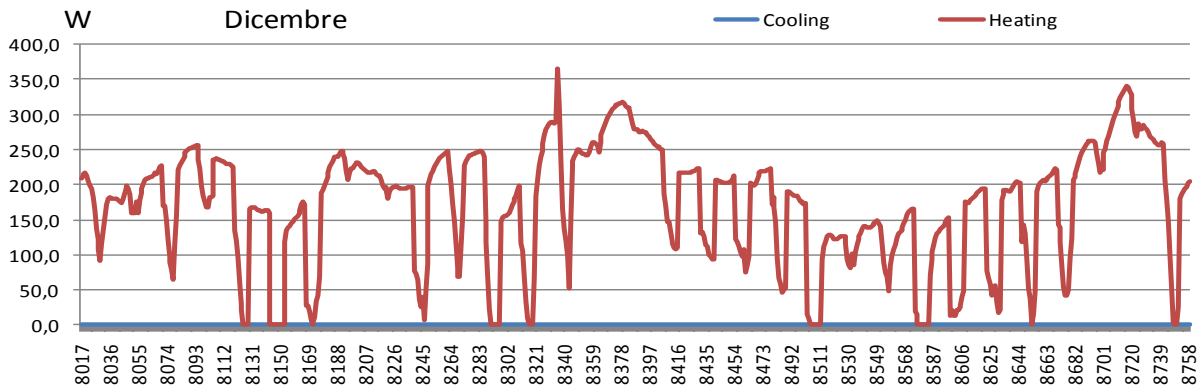
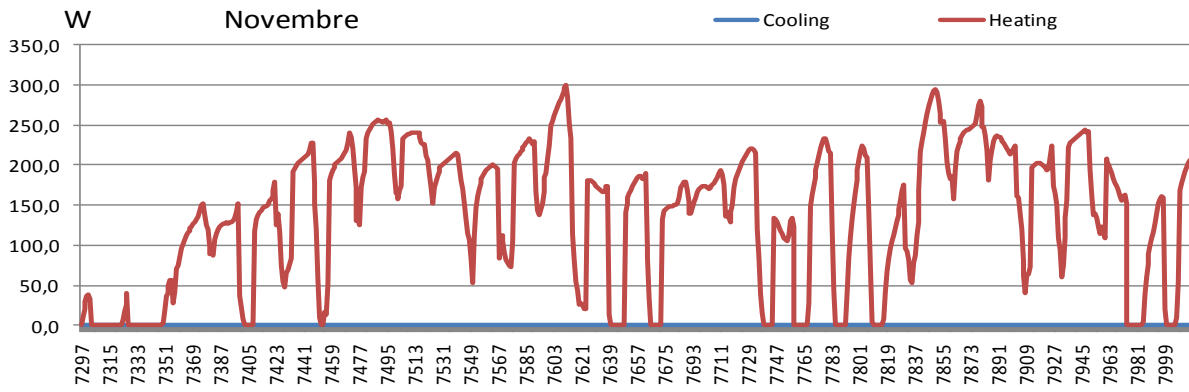
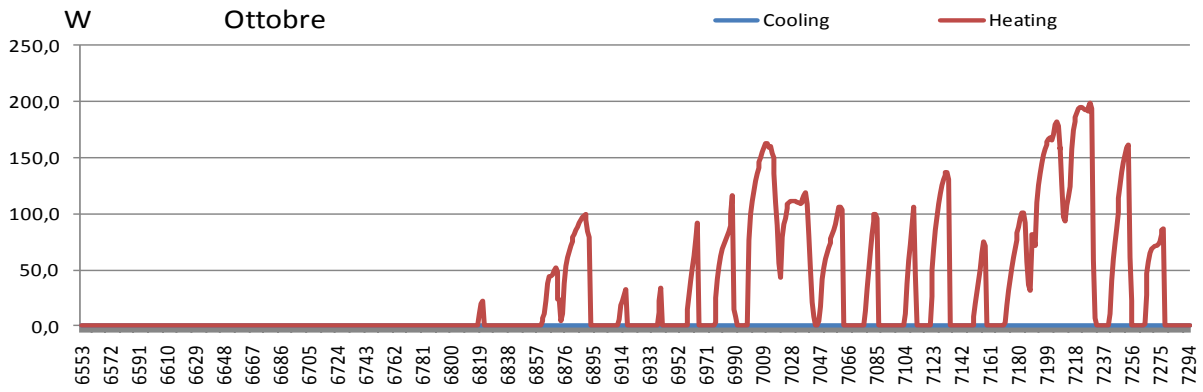
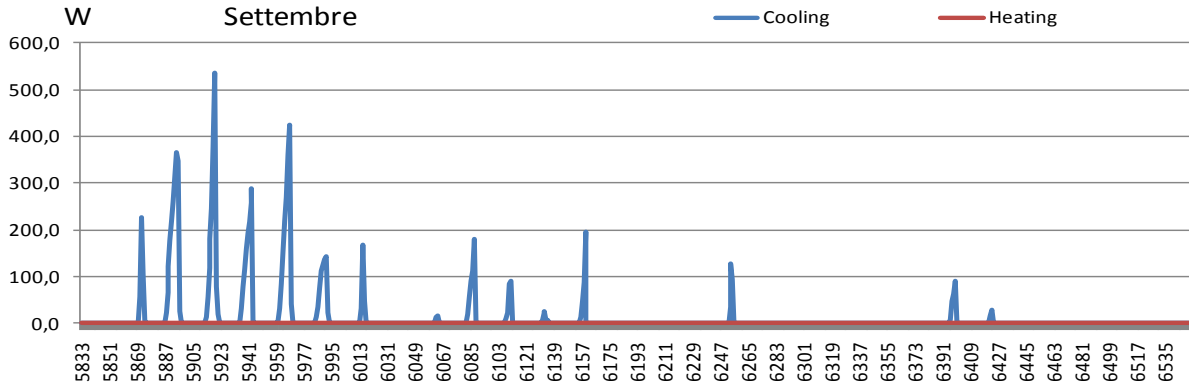




Richiesta Climatizzazione Test 1







- DETERMINAZIONE DEL LIVELLO DI ACCURATEZZA

Il livello di accuratezza è assegnato in base all'errore massimo rispetto ai risultati di riferimento. Nella tabella che segue sono riportati i risultati di riferimento, i risultati dei 12 test di validazione eseguiti, il valore dell'errore per ciascuno di essi ed il rispettivo livello di accuratezza.

Test	Q _{H,ref} kWh	Q _{C,ref} kWh	Q _{tot,ref} kWh	Q _H kWh	Q _C kWh	Q _{tot} kWh	rQ _H	rQ _C	Level
informative									
1	748,0	233,8	981,8	561,3	229,6	791,0	0,190	0,004	out of range
2	722,7	200,5	923,2	557,1	220,8	777,9	0,179	0,022	out of range
3	1368,5	43,0	1411,5	1176,6	65,6	1242,2	0,136	0,016	C
4	567,4	1530,9	2098,3	390,1	1354,7	1744,8	0,084	0,084	B
normative									
5	463,1	201,7	664,8	385,4	194,8	580,2	0,117	0,010	C
6	509,8	185,1	694,9	406,1	194,4	600,5	0,149	0,013	C
7	1067,4	19,5	1086,9	1003,4	30,3	1033,7	0,059	0,010	B
8	313,2	1133,2	1446,4	251,9	1068,8	1320,7	0,042	0,045	A
9	747,1	158,3	905,4	679,9	167,9	847,8	0,074	0,011	B
10	574,2	192,4	766,6	686,3	171,0	857,3	0,146	0,028	C
11	1395,1	14,1	1409,3	1326,8	25,3	1352,0	0,048	0,008	A
12	533,5	928,3	1461,8	480,6	888,6	1369,2	0,036	0,027	A

I primi quattro test (non obbligatori) non sono influenti sul esito della procedura di validazione.

Il livello peggiore conseguito negli 8 test obbligatori è C.

Pertanto il software risulta **validato** ed il livello di accuratezza assegnato è il **livello C**.

La validazione è da ritenersi conseguita nell'ambito delle condizioni di utilizzo descritte per il test.

9. Le simulazioni dinamiche per lo sviluppo di metodi di calcolo semplificati

Vengono descritte le potenzialità delle simulazioni dinamiche come strumento di ricerca per lo sviluppo di metodi di calcolo semplificati a partire dai risultati ottenuti con set di simulazioni progettate ad hoc. La procedura proposta prevede che i dati ottenuti dalle simulazioni siano analizzati con gli strumenti della statistica inferenziale per stabilire le relazioni tra le variabili considerate. Tali relazioni possono essere integrate nei metodi di calcolo quasi stazionari attualmente utilizzati per la certificazione e le diagnosi energetiche o essere utilizzati come supporto alla progettazione dei sistemi analizzati.

9. Dynamic simulations for the development of simplified calculation methods

The chapter deals with the dynamic simulation potential as a research instrument for the development of simplified calculation methods starting from the result of a simulation test designed ad hoc. The proposed procedure requires analyzing the data obtained from simulations with the inferential statistic instruments in order to establish the relations between the considered variables. Such relations can be integrated in the quasi steady calculation method in use for the energy certification or be used as a support for the design of the analyzed systems.

Simulazioni dinamiche come strumento di ricerca

Un'ulteriore applicazione delle simulazioni dinamiche concerne il loro utilizzo come strumento di sperimentazione (virtuale) di sistemi e componenti per l'architettura. Il fatto di avere a disposizione un modello di simulazione complesso, in grado di riprodurre in maniera realistica un elevato numero di interazioni fra le variabili coinvolte nel sistema di riferimento, consente infatti di testare il comportamento di un oggetto nelle più svariate condizioni ambientali e di utilizzo. I vantaggi, rispetto ad una sperimentazione *reale*, riguardano ovviamente l'enorme riduzione delle risorse e dei tempi e necessari, che in molti casi risulterebbero del tutto proibitivi.

Nel caso in oggetto era necessario ottenere dei dati relativi alle prestazioni del sistema dei condotti interrati per poter valutare in maniera corretta il contributo degli stessi ai fini del calcolo richiesto dalla norma UNI TS 11300. Le simulazioni sono state condotte quindi avendo come obiettivo ultimo non la valutazione di uno specifico sistema da realizzare in un contesto definito ma delle informazioni utili a descrivere il funzionamento del sistema in generale, utilizzabili in qualunque località italiana e con diversi tipi di funzionamento. Si è quindi progettata una serie di simulazioni che verificassero l'efficienza dei condotti nel più ampio numero di configurazioni possibili. Ne sono risultate 5.760 combinazioni, che in una sperimentazione *reale* avrebbero richiesto la realizzazione di altrettanti condotti in sei diverse località italiane ed almeno un anno di monitoraggio continuo. L'uso delle simulazioni dinamiche ha consentito di ottenere la stessa quantità di dati attraverso la predisposizione di 270 modelli (con un certo numero di parametri variabili) e circa otto ore di calcolo di un computer portatile.

Il numero di possibilità considerate rimangono ovviamente limitate ed è stato pertanto necessario introdurre nella sperimentazione una serie di semplificazioni e assunti di base sulle configurazioni dei sistemi.

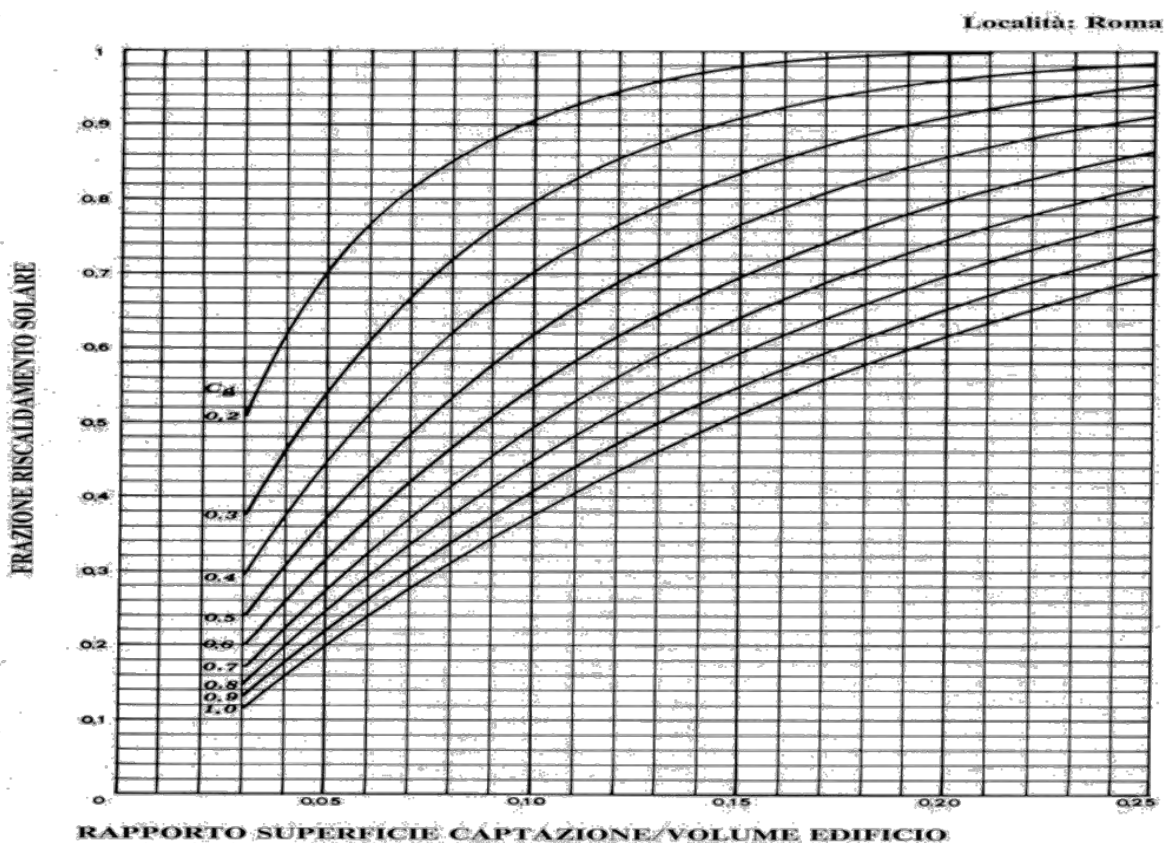
Nello specifico i dati raccolti sono stati poi elaborati attraverso un modello di regressione lineare, descritto nel paragrafo successivo. Si tratta di un metodo molto versatile e utilizzato in tutti i campi della ricerca e dell'analisi. Nell'ambito della ricerca sui sistemi passivi non sembra essere mai stato utilizzato anche se esistono una serie di esempi che testimoniano l'utilizzo di procedure simili per la produzione di tabelle o grafici da utilizzare come supporto alla progettazione. Si possono citare ad esempio le tabelle di Mazria in *The passive solar handbook*, un testo classico e fondante della materia o i diagrammi di Calderaro nel più recente *Architettura solare passiva*. Come si può osservare negli esempi riportati sono entrambi sistemi di relazione fra una variabile dipendente (rapporto fra superficie captante e volume o superficie riscaldata) e più variabili indipendenti (temperature, frazione di riscaldamento solare etc.), anche se vengono formalizzati come tabelle o grafici anziché come equazione (il che è invece indispensabile in questo caso, dati gli obiettivi della ricerca). I dati utilizzati per questo tipo di elaborazione possono essere frutto di dati sperimentali o, come accade il più delle volte, di simulazioni.

Il lavoro esposto nel capitolo successivo è stato condotto anche con l'obiettivo di sperimentare le potenzialità del metodo di ricerca applicato.

Mazria E., Tabella per il dimensionamento di muri solari

Temperature esterne	Gradi giorno/mese	mq di accumulo/ mq riscaldati	
climi freddi		MURATURA	ACQUA
-9,4	833	0,72 – 1	0,55 – 1
-6,7	750	0,6 – 1	0,45 – 0,85
-3,9	668	0,51 – 0,93	0,38 – 0,70
-1,1	583	0,43 – 0,78	0,31 – 0,55
climi temperati			
1,7	500	0,35 – 0,60	0,25 – 0,43
4,4	417	0,28 – 0,46	0,20 – 0,34
7,2	333	0,22 – 0,35	0,16 – 0,25

Calderaro V., Diagramma per il dimensionamento di muri solari



Regressioni statistiche

La *regressione* è uno strumento della statistica inferenziale, che ha lo scopo di stimare il valore di una variabile dipendente a partire dai valori noti di una o più variabili indipendenti. La relazione che lega tra loro il *valore atteso* (stimato) della prima ai valori delle seconde può essere ricavato dall'analisi di un *campione* statistico rappresentativo di una *popolazione* più ampia.

Il tipo di relazione matematica che intercorre fra due serie di valori può essere di diverso tipo e tra questi quello più semplice è quello *lineare*. In questo caso l'equazione che descrive il rapporto (e che definisce appunto una funzione lineare) è del tipo²³:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon$$

con

Y_i	variabile dipendente	(il valore da stimare)
X_i	variabile indipendente	(il valore noto)
β_0	intercetta	(il valore di Y con X = 0)
β_1	coefficiente angolare	(la pendenza della retta del grafico della funzione)
ε	errore statistico	(la parte di variabilità non legata alla relazione lineare)

Avendo a disposizione un campione statistico sufficientemente ampio si può quindi individuare una *retta di regressione* che rappresenti la funzione precedente senza la parte di errore statistico. L'equazione, privata del valore ε , rimane uguale a quella sopra riportata e definisce la retta più vicina all'andamento reale dei valori della variabile dipendente.

Quando questo tipo di regressione è applicata ad un campione fatto da più variabili indipendenti, ad ognuna di esse viene assegnato un coefficiente angolare (mentre l'intercetta rimane ovviamente unica) ed il modello prende il nome di *regressione lineare multipla*. È questo il modello applicato nella presente ricerca per la sperimentazione descritta nel capitolo 10.

Il metodo più diffuso per ricavare tale equazione è detto dei minimi quadrati e consiste nel definire la retta come quella che minimizza la somma dei quadrati degli scarti fra valori osservati e valori stimati, che ha la forma:

$$\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

con

Y_i valore osservato

\hat{Y}_i valore stimato

²³ Levine, Krehbiel, Berenson, *Statistica*, Pearson, 2010

Oltre alla presenza di una relazione di tipo lineare fra le variabili, il modello di regressione si basa su altre assunzioni che devono essere verificate per confermarne la validità:

- indipendenza dei residui: impone che non vi sia relazione tra i residui e riguarda i casi in cui i dati sono raccolti in momenti successivi e possono influenzarsi tra di loro
- normalità dei residui: richiede che i residui presentino una distribuzione *normale* rispetto ai valori della variabile indipendente
- omoschedasticità: impone che la varianza dei residui sia costante per i diversi valori della variabile indipendente

Tali assunzioni possono essere verificate al termine della regressione realizzando degli istogrammi di distribuzione e dei grafici di dispersione dei residui, cioè delle differenze fra i valori stimati e quelli osservati ($Y_i - \hat{Y}_i$).

10. Un caso applicato esemplificativo: la valutazione dei condotti interrati

La procedura descritta nel capitolo precedente è applicata al caso dei condotti interrati. Viene sviluppato un set di simulazioni tale da testare il sistema in diversi climi e configurazioni per un totale di 5.760 combinazioni. I dati raccolti vengono quindi analizzati, elaborati ed utilizzati infine per una regressione multipla lineare dalla quale si ottengono le equazioni utili al calcolo delle prestazioni in regime quasi stazionario.

10. An applied exemplifying case: the assessment of buried earth pipes

The procedure described in the previous chapter is applied to the case of buried earth pipes. A simulation set is developed to test the system in different climates and configuration for a total of 5.760 combinations. The collected data are then analyzed, processed and used for a multiple linear regression by which are obtained the equations needed for the performance calculations in a quasi steady regime.

Descrizione della procedura applicata

Procedura di calcolo della norma Uni TS 11300-1 e integrazione dei condotti interrati

I condotti interrati sono un sistema di trattamento o pre-trattamento dell'aria esterna per la ventilazione degli ambienti, che viene riscaldata o raffrescata attraverso il passaggio all'interno di tubature a contatto con il sottosuolo. Ulteriori dettagli sono forniti nel capitolo 2.

La procedura di calcolo per i fabbisogni di riscaldamento prevede che per ogni zona termica dell'edificio e per ogni mese dell'anno, gli scambi dovuti alla ventilazione vengano calcolati come prodotto del coefficiente di scambio termico per la differenza di temperatura interno-esterno per la durata del mese. L'equazione è la seguente:

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} * (\theta_{int,set,H} - \theta_e)$$

con

$Q_{H,ve}$ scambio termico per ventilazione

$H_{ve,adj}$ coefficiente di scambio termico per ventilazione corretto

$\theta_{int,set,H}$ temperatura interna di regolazione della zona considerata

θ_e temperatura esterna media del mese o della frazione di mese considerata

Il coefficiente di scambio termico per ventilazione corretto a sua volta è calcolato come

$$H_{ve,adj} = \rho_a * c_a * (\sum_k b_{ve,k} * q_{ve,k,mn})$$

con

$\rho_a * c_a$ capacità termica dell'aria

$q_{ve,k,mn}$ portata mediata sul tempo del flusso d'aria k-esimo

$b_{ve,k}$ fattore di correzione della temperatura da utilizzare per il flusso k-esimo

Quest'ultimo fattore correttivo consente di tener conto di eventuali sistemi di preriscaldamento, come nel caso dei condotti interrati. Viene calcolato, secondo la norma UNI EN ISO 13790:

$$q_{ve,k} = (\theta_{int,set} - \theta_{sup,k}) / (\theta_{int,set} - \theta_e)$$

con

$\theta_{sup,k}$ temperatura dell'aria preriscaldata

θ_e temperatura esterna

Per poter integrare nel calcolo il contributo dei condotti interrati si dovrebbe dunque ricercare attraverso le regressioni un modo per calcolare la temperatura dell'aria in uscita dai condotti o

l'efficienza di scambio degli stessi. Dopo alcune verifiche preliminari si è scelto di utilizzare quest'ultima grandezza che può essere definita come

$$e = (\theta_{\text{sup}} - \theta_e) / (\theta_{\text{sup}} - \theta_t)$$

con

θ_t temperatura del terreno alla profondità del condotto interrato

L'efficienza di scambio definisce dunque in che frazione la differenza di temperatura fra aria esterna e terreno si traduce in una differenza di temperatura fra aria esterna (da trattare) e aria preriscaldata (trattata), potendo assumere valori compresi tra 0 e 1.

Conoscendo il valore di e la temperatura dell'aria preriscaldata può essere calcolata come

$$\theta_{\text{sup}} = \theta_e + [e * (\theta_t - \theta_e)]$$

La temperatura del terreno può essere calcolata come²⁴

$$T_{z,t} = T_m - A_s \exp \left[-z \left(\frac{\pi}{365 \alpha_s} \right)^{1/2} \right] \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \left[t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\pi \alpha_s} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

con

$T_{z,t}$	temperatura del terreno alla profondità z e al tempo t	(°C)
T_m	temperatura media annuale in superficie	(°C)
A_s	ampiezza della variazione della temperatura in superficie	(°C)
z	profondità di calcolo	(m)
α_s	diffusività del suolo	(m ² /gg)
t	tempo	(gg)
t_0	costante di fase della temperatura del terreno	(gg)

Temperatura media, ampiezza della variazione e costante di fase (il numero del giorno dell'anno in cui si raggiunge la temperatura minima) del terreno, riferendosi alla superficie, possono essere approssimate con le grandezze omologhe riferite all'aria esterna e ottenibili dalle medie climatiche disponibili per tutte le stazioni meteorologiche presenti sul territorio nazionale.

Avendo ottenuto la temperatura di preriscaldamento potrà infine essere ricavato di conseguenza il fattore $b_{ve,k}$ completando la procedura per l'inclusione nel calcolo dei condotti interrati.

Il dato mancante, l'efficienza di scambio dei condotti interrati e , sarà ottenuta attraverso le regressioni sui dati raccolti dai risultati delle simulazioni.

²⁴ *EnergyPlus Engineering Reference*. Tale formula è utilizzata dal software con cui sono state eseguite le simulazioni, ma modelli di calcolo molto simili sono riportati in vari autori. Tra questi Raimondo L. in Grosso, 2008

Progettazione delle simulazioni

Il set di simulazioni è stato progettato per consentire la raccolta di dati in condizioni quanto più possibile differenziate nell'ambito delle soluzioni possibili per le applicazioni più diffuse.

Il primo passo è stato la selezione di sei località rappresentative delle diverse condizioni climatiche sul territorio nazionale. Dopo un'analisi delle medie climatiche delle principali stazioni di rilevamento presenti in Italia, la scelta è ricaduta su Bolzano, Verona, Firenze, Roma, Napoli e Catania.

Dato le peculiarità del sistema il secondo importante fattore ambientale da considerare è il tipo di terreno con cui viene scambiato il calore. Quest'ultima caratteristica non è necessariamente legata alla collocazione geografica del ma dipende dalle specifiche condizioni del sito. Per avere un'assistenza sufficiente si sono presi in considerazione quattro diverse situazioni: terreno compatto nudo in superficie, terreno compatto pavimentato, terreno leggero nudo in superficie e terreno leggero pavimentato. Tali variazioni non hanno un effetto diretto, ma dato le diverse conduttività e temperature superficiali, producono nel corso dell'anno temperature diverse a contatto con i condotti ed una diversa efficienza nello scambio termico.

Gli ulteriori parametri considerati sono relativi alla progettazione del sistema in sé e riguardano profondità, diametro e lunghezza dei condotti e portata d'aria trattata. Il *range* di variabilità considerato è stato desunto principalmente dalla letteratura tecnica²⁵. Le profondità adottate sono di 2, 3 e 4 m sotto il livello del suolo, mentre i diametri interni dei condotti sono stati fissati fra 0,20 e 0,40 m con intervalli di 0,05m. Come lunghezza si è scelto di variare fra un minimo di 10 ed un massimo di 100 m, con valori intermedi di 40 e 70 m. Per la portata infine si sono scelti valori di 100, 400, 700 e 1.000 mc/h, che con i diametri adottati corrispondono a velocità dell'aria all'interno dei condotti comprese fra i 0,05 e 2,2 m/s. Avendo incluso anche condotti molto brevi (10 m), le velocità dell'aria più basse sono necessarie per consentire un tempo minimo di permanenza dell'aria nel condotto.

I parametri considerati ed i valori che assumono nelle diverse configurazioni sono riassunti nella tabella alla pagina seguente.

²⁵ Grosso, 2008

	Parametri	Variazioni
Ambientali	Località	Bolzano Verona Firenze Roma Napoli Catania
	Terreno	compatto nudo compatto pavimentato leggero nudo leggero pavimentato
Tecnologici	lunghezza	10 m 40 m 70 m 100 m
	diametro	0,20 m 0,25 m 0,30 m 0,35 m 0,40 m
	profondità	-2 m -3 m -4 m
	lunghezza	10 m 40 m 70 m 100 m

La combinazione delle diverse variazioni ha dato origine ad un set di 5.760 varianti. Le simulazioni, condotte nei periodi di riscaldamento delle 6 località ha prodotto un campione statistico di 33.600 osservazioni.

Applicazione della procedura e risultati

Tutte le simulazioni progettate sono state eseguite con EnergyPlus 6.0, un modello di simulazione già precedentemente descritto. Dato che la procedura di calcolo quasi stazionaria su cui si lavora è definita su base mensile, si è utilizzato lo stesso intervallo di tempo per aggregare i dati di output, che comunque sono stati ottenuti attraverso un calcolo dinamico impostato su 6 *time step* orari, cioè iterato ogni 10 minuti (di tempo simulato).

Tutti i dati sono stati quindi elaborati in un foglio di calcolo elettronico utilizzato sia per le analisi preliminari che per le regressioni statistiche.²⁶

Prima di arrivare alle regressioni finali sono stati eseguiti diverse analisi e tentativi esplorativi, per verificare la plausibilità dell'uso del modello lineare, la correlazione tra i dati ottenuti dalle simulazioni o rielaborati nel foglio di calcolo, le scelte più appropriate sulle variabili da utilizzare.

Tale lavoro ha portato all'individuazione dell'efficienza di scambio dei condotti (già definita nel paragrafo precedente) come variabile dipendente ed alla selezione, come variabili dipendenti di lunghezza, conduttività del terreno, diametro e portata elevata a potenza 0,1.

L'efficienza di scambio non è un risultato diretto delle simulazioni ma una variabile calcolata a partire da quelle disponibili. Inoltre si tratta di un valore indipendente (formalmente) dalla località e dal clima che infatti non compaiono direttamente tra le variabili selezionate. Naturalmente le prestazioni reali sono influenzate da questi elementi e infatti le temperature del terreno e dell'aria registrate nelle simulazioni sono utilizzate nel calcolo della variabile *efficienza di scambio* e quelle della località sulla quale si volesse applicare la procedura devono essere utilizzate nel calcolo finale del fattore b_{ve} .

Nella seguente tabella si riassumono le variabili analizzate ed i relativi valori di correlazione²⁷ con l'efficienza di scambio e e con il fattore b_{ve} . In corsivo sono segnalate quelle frutto di elaborazione da altre variabili.

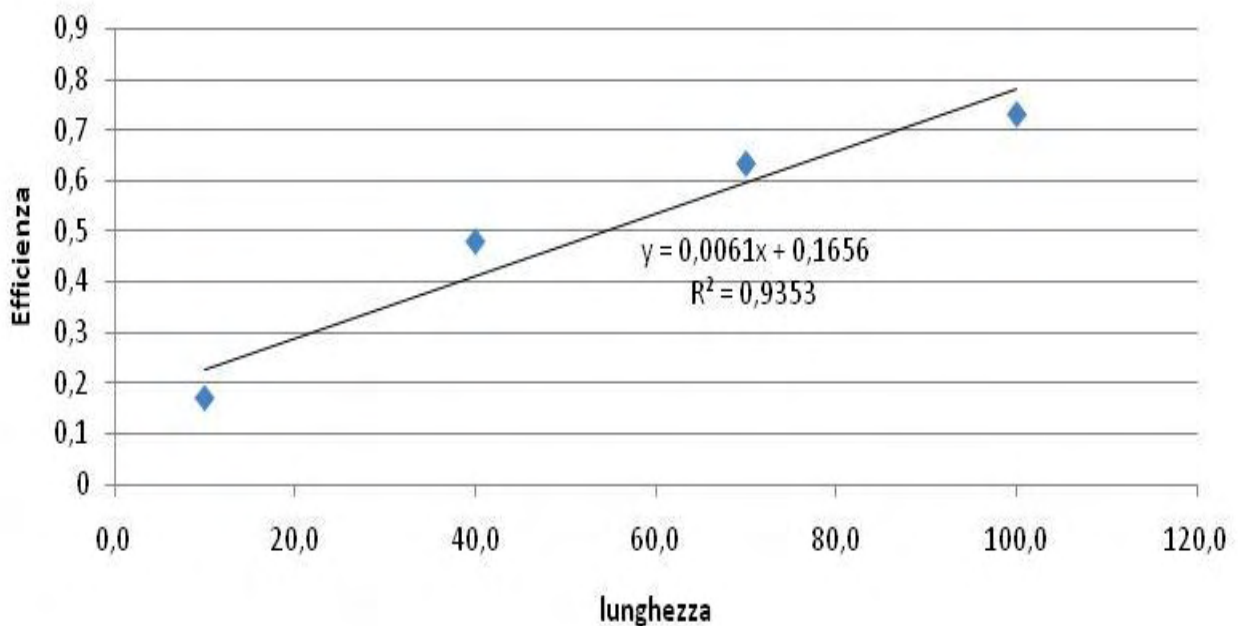
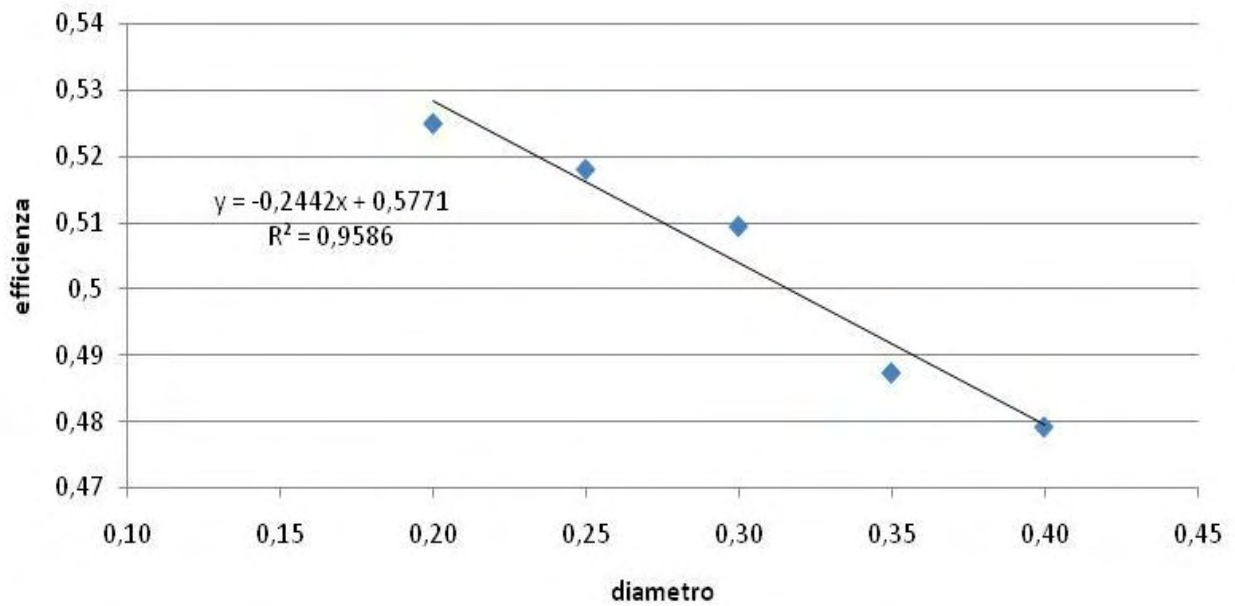
	Correlazione con e	Correlazione con b_{ve}
Temperatura Aria Esterna (°C)	-0,004	0,142
DeltaT aria esterna – terreno (°C)	-0,131	-0,485
Temperatura terreno (°C)	-0,181	-0,474
Diffusività terreno (m ² /gg)	0,012	-0,057
Conduttività Terreno (W/mK)	0,383	0,002
Tipo Terreno (<i>dummy</i>)	-0,351	-0,023
Profondità (m)	-0,002	-0,080
Lunghezza (m)	0,705	-0,484
Diametro (m)	-0,059	0,039
Area di scambio (mq)	0,619	-0,426
Velocità aria (m/s)	-0,323	0,238
Portata (mc/s)	-0,035	0,019
Portata ^{0,1}	-0,500	0,366
Tempo di permanenza aria aria (s)	0,610	-0,439
Tempo di permanenza aria ^{0,1}	0,786	-0,557

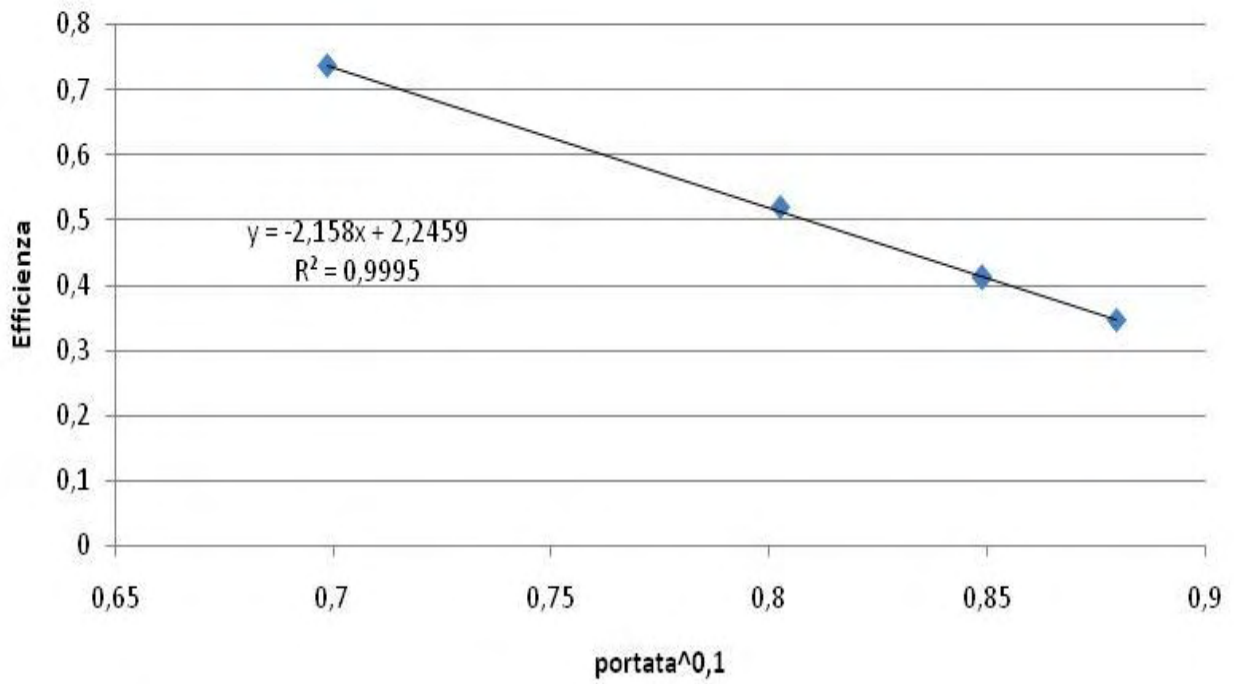
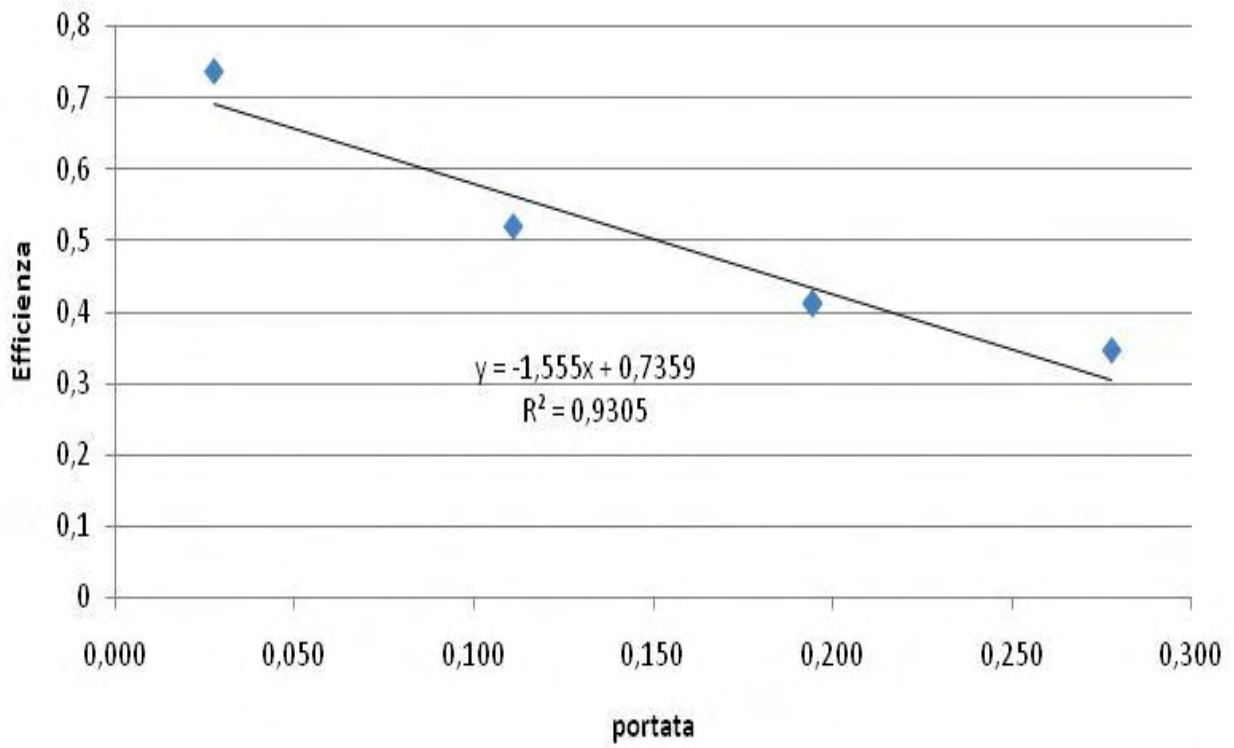
²⁶ Il software utilizzato è *Microsoft Excel*

²⁷ Il coefficiente di correlazione misura l'intensità della relazione lineare fra due variabili: 1 e -1 rappresentano le intensità massime, 0 la minima.

Le variabili con i coefficienti più alti non sono necessariamente le migliori ai fini della regressione, anche perché in alcuni casi hanno anche una correlazione reciproca (fra variabili indipendenti).

Un ulteriore fase di analisi è partita dalla creazione di una *tabella pivot*, che consente la gestione di grandi quantità di dati e l'analisi su più dimensioni. Utilizzando tale tabella sono stati prodotti anche i grafici di dispersione dei valori medi della variabile dipendente rispetto alle diverse variabili indipendenti. Di seguito vengono riportati quelli relativi alle variabili utilizzate per la regressione, completi dalle linee di tendenza, che indicano (anche se il basso numero di punti riduce l'affidabilità), una buona approssimazione del modello lineare, con coefficienti di determinazione compresi tra 0,93 e 1. Dai grafici relativi alla portata è evidente come l'elevazione a potenza della portata produce una *linearizzazione* della variabile che si intuiva già dai coefficienti di correlazione.





Dopo l'analisi dei risultati e la verifica dei presupposti, è stato eseguito, secondo il metodo dei minimi quadrati, il calcolo di regressione del quale si riportano risultati e statistiche.

	Coefficienti	Errore standard	Stat t	Valore di significatività	Inferiore 95%	Superiore 95%	Inferiore 95,0%	Superiore 95,0%
Intercetta	1,827336	0,0064	286,28	0,0000	1,8148	1,8398	1,8148	1,8398
Cond. Terreno	0,10828	0,0005	223,77	0,0000	0,1073	0,1092	0,1073	0,1092
Lunghezza	0,006149	0,0000	411,76	0,0000	0,0061	0,0062	0,0061	0,0062
Portata ^{0,1}	-2,15251	0,0073	-294,44	0,0000	-2,1668	-2,1382	-2,1668	-2,1382
Diametro	-0,24443	0,0071	-34,51	0,0000	-0,2583	-0,2306	-0,2583	-0,2306

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,94949
R al quadrato	0,901531
R al quadrato corretto	0,901519
Errore standard	0,091799
Osservazioni	33596

Le statistiche indicano una buona approssimazione, con un coefficiente di determinazione R sufficientemente elevato e una buona rispondenza al modello lineare con valori di significatività pari o molto prossimi allo 0. L'errore standard, pari a 0,09 può ritenersi accettabile.

L'equazione che ne risulta, per la stima dell'efficienza di scambio, è

$$e = 1,827336 + 0,10828C + 0,006149L - 2,15251P^{0,1} - 0,24443D$$

con

<i>e</i>	efficienza di scambio	(adim.)
<i>C</i>	conduttività terreno	(W/mK)
<i>L</i>	lunghezza condotto	(m)
<i>P</i>	portata condotto	(mc/s)
<i>D</i>	diametro condotto	(m)

L'intercetta, non avendo senso valori delle variabili indipendenti pari a 0, non assume in questo caso particolare significato, mentre i coefficienti angolari delle singole variabili definiscono il tipo e l'intensità delle relazioni. Ad esempio il coefficiente positivo relativo alla lunghezza indica che l'efficienza cresce con l'aumentare di questo valore e, più precisamente, che per ogni metro aggiuntivo si ottiene uno 0,006149 in più di efficienza.

L'equazione ha dimostrato di rimanere plausibile all'interno di limiti più ristretti di quelli definiti dalla variabilità dei parametri utilizzati per la regressione. Si ritiene che possa risultare sufficientemente affidabile nei limiti di un campo di applicazione così definito:

Conduttività del terreno:	0,6-2,4 W/mk
Lunghezza del condotto:	20-60 m
Diametro del condotto:	0,30 - 0,40 m
Portata del condotto:	400-600 m ³ /h

All'interno di questi limiti il valore dell'efficienza di scambio varia all'incirca tra 0,12 e 0,65.

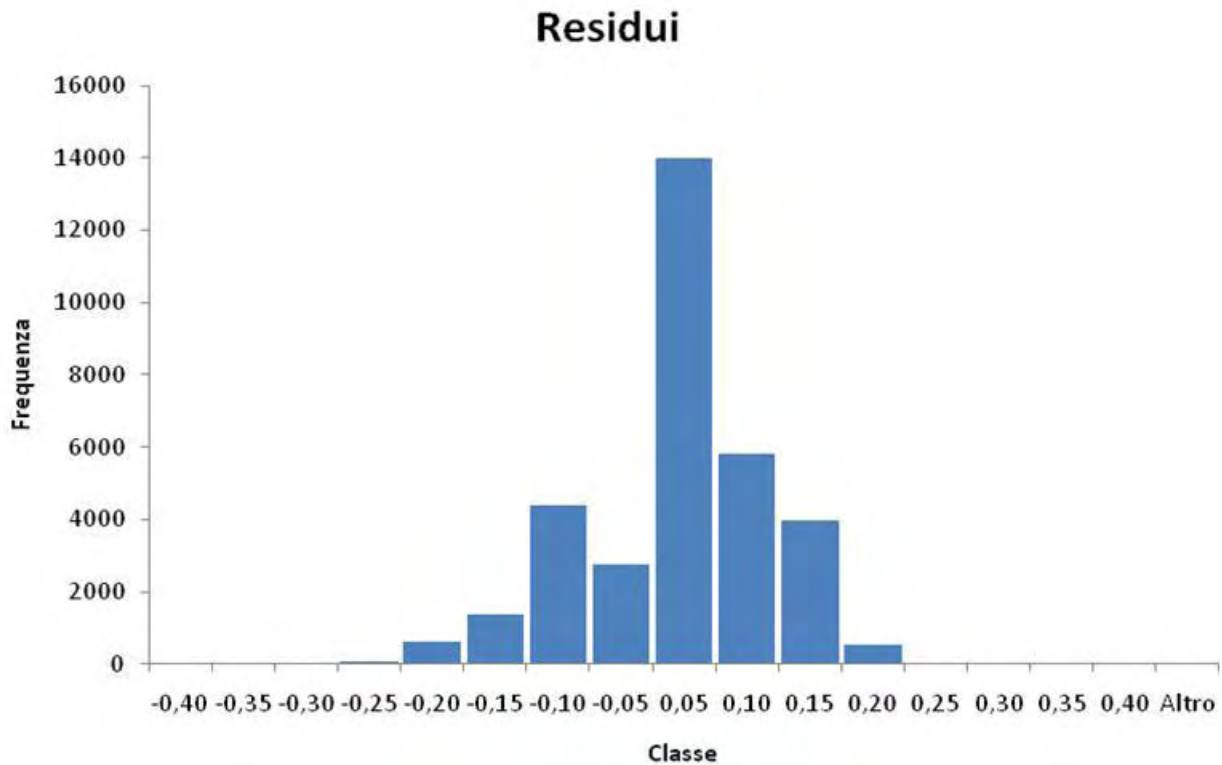
Altri assunti del modello sono una distanza minima tra i condotti di 2,5-3 m, tale da non interferire l'uno con l'altro, e l'utilizzo di tubazioni con conduttività pari a circa 0,3 W/mK.

Visto anche il carattere sperimentale di questa ricerca, sarebbe opportuno un ulteriore lavoro di verifica e validazione sul modello di calcolo proposto, anche se ciò che non è possibile in questa sede. Ad ogni modo si ritiene che, nella consapevolezza dei limiti descritti, la formula possa essere utilizzata.

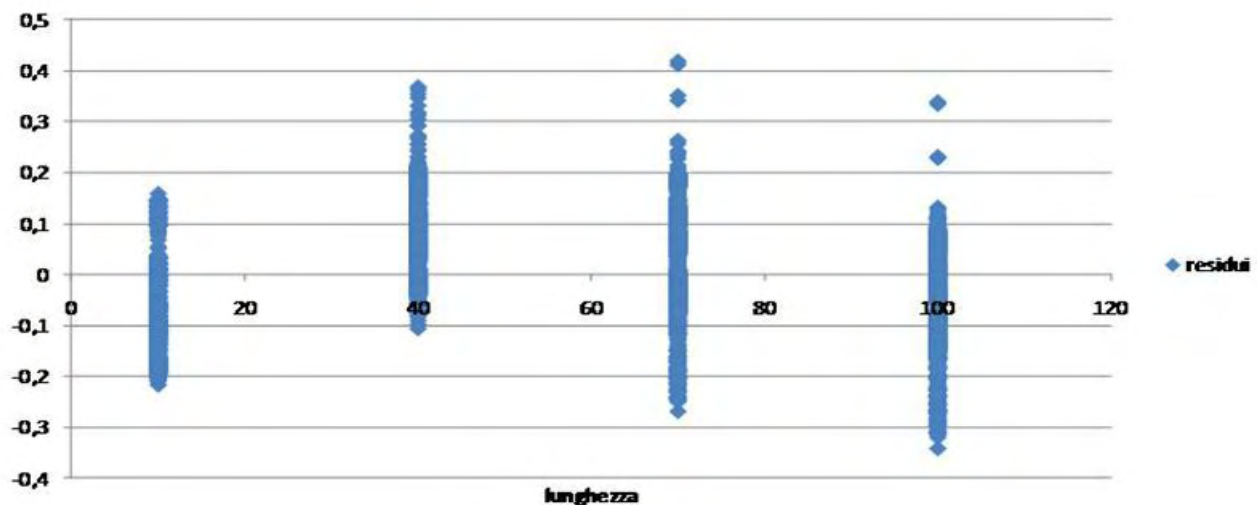
Si ritiene altresì che il metodo che ha prodotto tale risultato, la cui verifica era uno degli obiettivi della ricerca, possa essere preso in considerazione per ulteriori applicazioni ed approfondimenti.

La verifica conclusiva sul rispetto delle assunzioni del modello di regressione lineare (capitolo 9) è effettuata attraverso l'analisi dei residui.

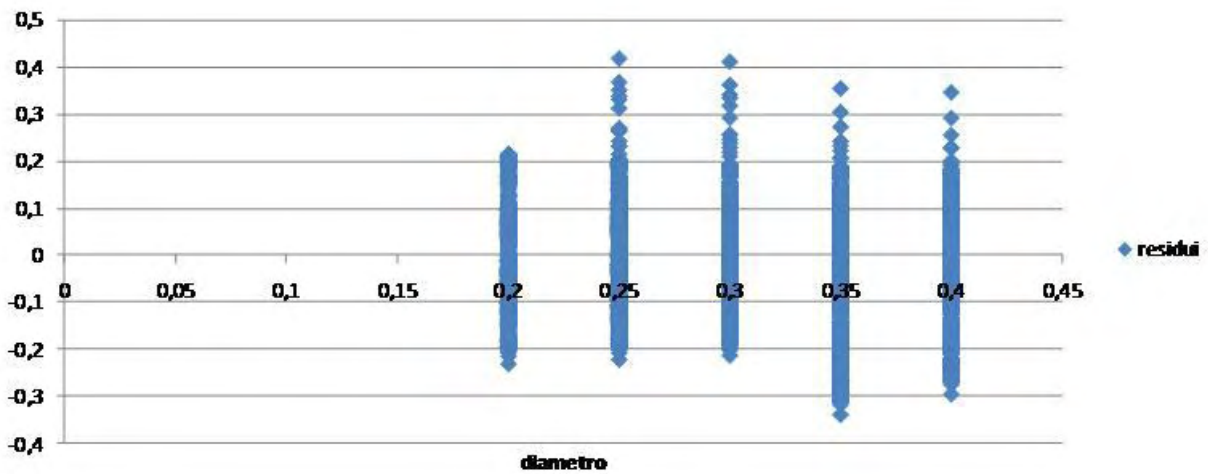
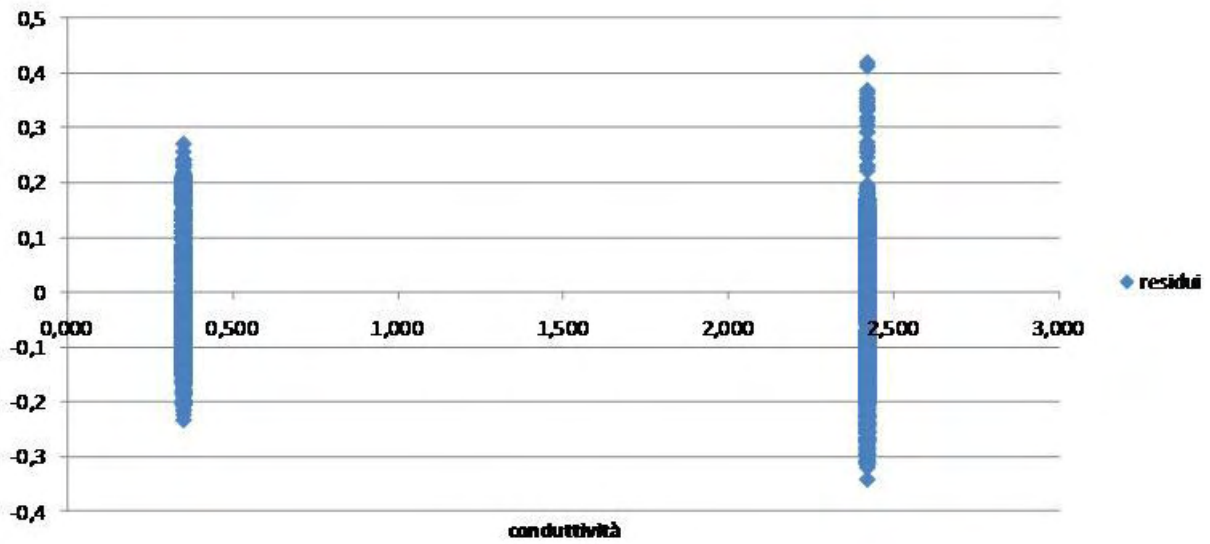
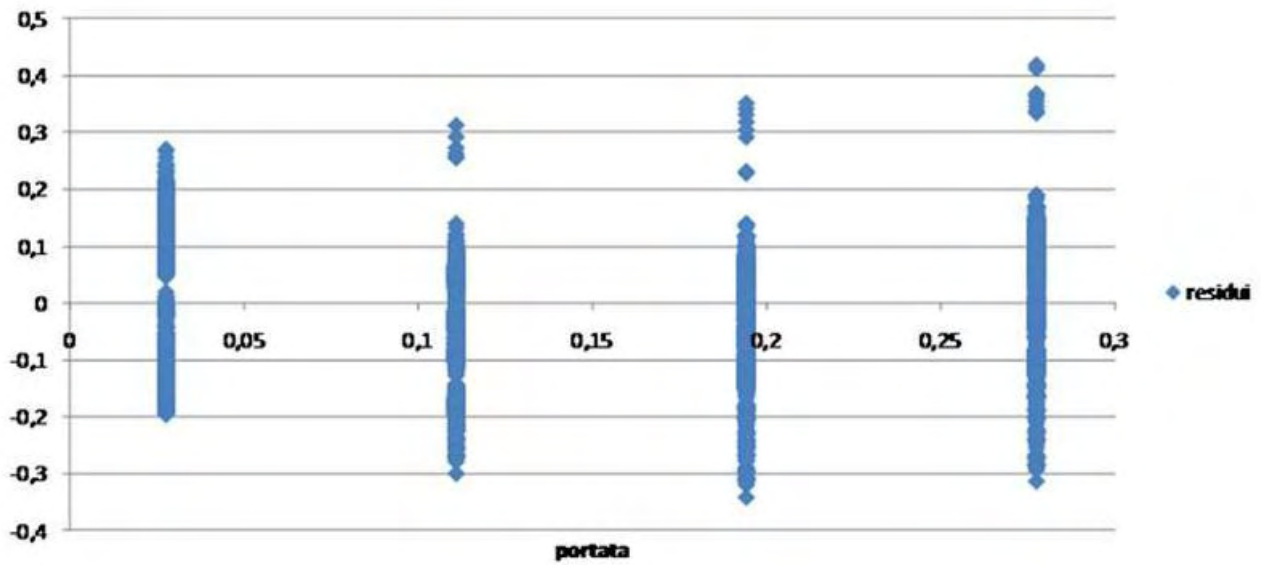
L'esame del grafico sottostante conferma una distribuzione sostanzialmente normale dell'istogramma dei residui. Questa condizione può considerarsi soddisfacente, anche in considerazione dell'elevata robustezza del modello a lievi violazioni dell'assunto²⁸.



I grafici successivi riportano invece la distribuzione dei residui contro i valori delle variabili indipendenti, verificando gli assunti di linearità e omoschedasticità.



²⁸ Levine, Krehbiel, Berenson, *Statistica*, Pearson, 2010



Conclusioni: sintesi dei risultati e possibili sviluppi futuri della ricerca

La ricerca traccia un quadro dei problemi legati alla valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici in relazione all'uso dei sistemi passivi e propone due contributi basati su approcci differenti. Entrambe le soluzioni sono immediatamente utilizzabili per la certificazione energetica e più in generale per la valutazione dei sistemi passivi. Inoltre vengono fornite indicazioni sulla validità dei due metodi sperimentati. Si tratta tuttavia di soluzioni parziali che certamente non esauriscono il problema e che si prestano ad ulteriori sviluppi, sia riguardo alla propria accuratezza ed affidabilità, sia in relazione alle norme tecniche alle quali si rapportano, per le quali è già definito un piano di aggiornamenti.

Conclusions: results summary and possible future developments

The research maps out a description of the problems linked to the assessment of the energy performance of buildings in relation to the use of passive systems and proposes two contributions based on different approaches. Both solutions are immediately usable for energy certification and for passive systems assessment in general. Furthermore, indications on the validity of two experimented methods are provided. Nevertheless, they are partial solutions that certainly do not exhaust the problem and remain open to further developments, concerning both the accuracy/reliability of methods and the relations with the standards they are linked to, for which a revision plan is already scheduled.

Sintesi dei principali risultati ottenuti

La ricerca è stata condotta con il principale obiettivo di offrire un contributo alla valutazione dei sistemi passivi, sia da un punto di vista puramente tecnologico, al fine di agevolare il lavoro progettuale che al momento non può contare su strumenti di semplice e rapido utilizzo, sia dal punto di vista normativo, al fine di consentire un corretto calcolo dei contributi di tali sistemi all'efficienza energetica degli edifici, con tutto ciò che ne consegue in termini di certificazione energetica e di convenienza degli investimenti economici. La metodologia di valutazione scelta sia come strumento che come oggetto della ricerca è quella delle simulazioni dinamiche, che presenta caratteristiche particolarmente adatte agli scopi e della quale, come ulteriore obiettivo della ricerca, si volevano verificare le potenzialità applicative.

In questo quadro i principali risultati conseguiti dalla tesi sono due e riguardano l'applicazione diretta della suddetta metodologia alla certificazione energetica e l'elaborazione di un metodo semplificato per la valutazione del sistema dei condotti interrati, a partire da una sperimentazione effettuata con l'utilizzo di simulazioni dinamiche.

Per quanto riguarda il primo punto, la ricerca ha prodotto la validazione di un software di simulazione dinamica particolarmente avanzato, EnergyPlus, secondo la norma tecnica europea di riferimento. Tale strumento consente di valutare pressoché qualsiasi sistema passivo, anche di tipo sperimentale, in maniera precisa ed affidabile e in conseguenza della validazione potrà essere utilizzato, anche se con alcune limitazioni, ai fini della certificazione energetica, consentendo una migliore valutazione dei sistemi passivi e più in generale dei provvedimenti di efficienza energetica di natura non impiantistica. Inoltre si tratta di un software che, sviluppato dal Governo Statunitense soprattutto a fini di ricerca, viene messo a disposizione liberamente e può quindi essere impiegato da qualunque professionista. Al momento il maggiore ostacolo alla sua diffusione è rappresentato dalle notevoli difficoltà di utilizzo nella costruzione dei modelli e nella gestione dei risultati.

Nel secondo caso è stato elaborato un metodo di calcolo che consente di integrare la valutazione dei condotti interrati nel procedimento *quasi stazionario* attualmente in uso per la certificazione energetica e più in generale di stimare velocemente l'efficienza energetica del sistema e/o dimensionarlo a partire da pochi e facilmente reperibili dati di progetto. Il metodo consiste nella semplice soluzione di un'equazione. Quest'ultima è stata ricavata tramite una regressione statistica dai dati della sperimentazione condotta per mezzo di simulazioni dinamiche su un elevato numero di sistemi osservati in diversi climi e configurazioni. Il metodo, che deve essere considerato ancora in fase sperimentale, ha un campo di applicabilità limitato e presuppone alcune condizioni di partenza definite.

Un ulteriore obiettivo di questa parte dello studio riguardava la verifica della linea di ricerca prospettata. Avendo ottenuto il risultato descritto, anche se parziale e in attesa di ulteriori sviluppi, si ritiene che il metodo utilizzato possa essere ulteriormente applicato e approfondito.

Entrambe le soluzioni, pur essendo suscettibili di miglioramenti, sviluppi e verifiche ulteriori, sono immediatamente operative.

Possibili sviluppo futuri della metodologia e delle sue potenzialità applicative

I contributi offerti da questa tesi alle problematiche individuate nella prima parte della ricerca, rappresentano un parziale punto di arrivo, ma ancor più possono essere una base di partenza per lo sviluppo di soluzioni più generali e affidabili. Inoltre, anche a prescindere da eventuali miglioramenti, dato il quadro di riferimento in costante evoluzione, le soluzioni elaborate, per rimanere operative, avranno bisogno di un costante aggiornamento nel tempo.

La validazione dei software riguarda infatti versioni specifiche e deve essere ripetuta man mano che queste vengono aggiornate dagli sviluppatori. Inoltre anche le norme tecniche utilizzate per la validazione sono soggette ad aggiornamento. In più è probabile che nel corso dei prossimi anni le simulazioni dinamiche verranno regolate in maniera più dettagliata fino ad essere integrate in maniera organica fra i sistemi di calcolo *ufficiali*.

Quelle che inoltre saranno sicuramente aggiornate, sono le norme UNI TS 11300, che in quanto *specifiche tecniche* devono essere sottoposte a verifiche periodiche. Ciò renderà necessari gli aggiornamenti anche per la soluzione ad esse relative (metodo di calcolo semplificato).

Quest'ultima soluzione, che presenta elementi di interesse anche indipendentemente dalla certificazione energetica, è quella con i più ampi margini di sviluppo. Trattandosi di una sperimentazione, sarebbero opportuna una fase di verifica e validazione che non è stata possibile in questa sede. Inoltre il modello potrebbe essere esteso ad altri tipi di sistemi passivi, che presentano complessità anche maggiori di quelli analizzati. C'è un buon margine di miglioramento anche sul piano dell'accuratezza ed affidabilità del metodo, che può essere ulteriormente calibrato sia nella fase *sperimentale*, di progettazione ed esecuzione delle simulazioni, sia nella fase successiva di analisi dei dati e verifica dei risultati.

Apparati

Oltre alla bibliografia, contenente i riferimenti tecnico-scientifici e normativi della ricerca, la tesi è corredata da una serie di appendici che racchiudono l'insieme dei dati necessari a rendere la sperimentazione condotta verificabile e ripetibile. In particolare sono riportati i principali dati di input e output utilizzati per i test di validazione (capitolo 8) e per le simulazioni eseguite ai fini delle regressioni statistiche (capitolo 10).

Annexes

In addition to the bibliography, containing the technical, scientific and normative references of the research, the thesis is provided with a series of appendixes needed to make the conducted experimentation verifiable and repeatable. Namely, it includes the main input and output data used for validation tests (chapter 8) and for the simulations aimed to the statistic regression (chapter 10).

Appendici

A. Dettaglio dei dati di input per i test di validazione

Di seguito si riportano i dettagli del file climatico utilizzato (e appositamente creato secondo le indicazioni della norma) per tutti i test di validazione ed i dati di input utilizzati nel *test set 5*, l'unico che ha dato esito positivo. Per la precisione si tratta rispettivamente dei testi dei file *.epw* (*EnergyPlus Weather*), e *.idf* (*input data file*), che raccolgono tutte le informazioni utilizzate per il calcolo in EnergyPlus.

EPW TRAPPES

Per ragioni di spazio è qui riprodotta solo la prima parte delle righe contenenti i dati climatici orari, sufficienti per avere riscontro di come sia stato costruito l'intero file (che avrebbe occupato circa 90 pagine). Le righe mancanti possono essere ricostruite a partire dai dati contenuti nel rapporto di validazione al capitolo 8 e nell' *Annex A* della norma EN 15625:2008.

```
2011.1.1.1,60,????????????????????????????????????????4.7,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.2,60,????????????????????????????????????????4.6,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.3,60,????????????????????????????????????????4.5,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.4,60,????????????????????????????????????????4.5,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.5,60,????????????????????????????????????????4.2,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.6,60,????????????????????????????????????????3.6,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.7,60,????????????????????????????????????????3.5,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.8,60,????????????????????????????????????????3.4,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.9,60,????????????????????????????????????????3,99.9,999,999999,0,0,0,5,6,21.8,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.10,60,????????????????????????????????????????2.9,99.9,999,999999,0,0,0,0,5,16.6,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.11,60,????????????????????????????????????????3.2,99.9,999,999999,0,0,0,0,3,1.57,5,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.12,60,????????????????????????????????????????3.6,99.9,999,999999,0,0,0,7,1.97,8,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.13,60,????????????????????????????????????????4.1,99.9,999,999999,0,0,0,2,1.54,9,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.14,60,????????????????????????????????????????4.2,99.9,999,999999,0,0,0,5,1.73,7,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.15,60,????????????????????????????????????????4.6,99.9,999,999999,0,0,0,5,6.54,5,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.16,60,????????????????????????????????????????5.1,99.9,999,999999,0,0,0,1,4.11,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.17,60,????????????????????????????????????????4.9,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.18,60,????????????????????????????????????????4.6,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.19,60,????????????????????????????????????????4.4,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.20,60,????????????????????????????????????????4.2,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.21,60,????????????????????????????????????????4.1,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.22,60,????????????????????????????????????????4.1,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.23,60,????????????????????????????????????????4.9,9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.1.24,60,????????????????????????????????????????3.9,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.1,60,????????????????????????????????????????3.7,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.2,60,????????????????????????????????????????3.6,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.3,60,????????????????????????????????????????3.5,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.4,60,????????????????????????????????????????3.2,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.5,60,????????????????????????????????????????3.2,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.6,60,????????????????????????????????????????2.6,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.7,60,????????????????????????????????????????2.2,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.8,60,????????????????????????????????????????2.7,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.9,60,????????????????????????????????????????2.9,99.9,999,999999,0,0,0,1,4.11,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.10,60,????????????????????????????????????????3.9,99.9,999,999999,0,0,0,3,1.41,1,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.11,60,????????????????????????????????????????3.3,99.9,999,999999,0,0,0,3,57.5,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.12,60,????????????????????????????????????????3.4,99.9,999,999999,0,0,0,5,27.6,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.13,60,????????????????????????????????????????3.2,99.9,999,999999,0,0,0,3,2.68,5,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.14,60,????????????????????????????????????????3.2,99.9,999,999999,0,0,0,2,5.52,1,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.15,60,????????????????????????????????????????2.9,99.9,999,999999,0,0,0,5,6.54,5,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.16,60,????????????????????????????????????????2.5,99.9,999,999999,0,0,0,1,4.11,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.17,60,????????????????????????????????????????2.2,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.18,60,????????????????????????????????????????2.3,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.19,60,????????????????????????????????????????2.4,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.20,60,????????????????????????????????????????2.6,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.21,60,????????????????????????????????????????2.9,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.22,60,????????????????????????????????????????3.9,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.23,60,????????????????????????????????????????3.2,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.2.24,60,????????????????????????????????????????3.3,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.3.1,60,????????????????????????????????????????3.4,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.3.2,60,????????????????????????????????????????3.4,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.3.3,60,????????????????????????????????????????3.4,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
2011.1.3.4,60,????????????????????????????????????????3.3,99.9,999,999999,0,0,0,0,0,0,0,0,999,2.5,5,5,777.7,77777.9,999999999,0,0,0,88,0,0,0
```

IDF TEST SET 5

Per ragioni di spazio è qui riprodotto solo il file relativo al primo test della serie, sufficiente ad avere riscontro di come siano stati costruiti gli input relativi a tutti i 12 test (che qui avrebbero occupato circa 80 pagine). I file mancanti possono essere ricostruiti a partire dalle informazioni contenute nel rapporto di validazione al capitolo 8 e nella norma EN 15265:2008 e

TEST 01

!-Generator IDFEditor 1.38a

!-Option SortedOrder

!-NOTE: All comments with '!' are ignored by the IDFEditor and are generated automatically.

!- Use '!' comments if they need to be retained when using the IDFEditor.

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: VERSION =====

Version,

6.0.0.023; !- Version Identifier

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SIMULATIONCONTROL =====

SimulationControl,

No, !- Do Zone Sizing Calculation

No, !- Do System Sizing Calculation

No, !- Do Plant Sizing Calculation

No, !- Run Simulation for Sizing Periods

Yes; !- Run Simulation for Weather File Run Periods

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: BUILDING =====

Building,

Test Room01, !- Name

0, !- North Axis {deg}

Suburbs, !- Terrain

0.05, !- Loads Convergence Tolerance Value

0.05, !- Temperature Convergence Tolerance Value {deltaC}

FullExteriorWithReflections, !- Solar Distribution

25; !- Maximum Number of Warmup Days

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SHADOWCALCULATION =====

ShadowCalculation,

20, !- Calculation Frequency

15000; !- Maximum Figures in Shadow Overlap Calculations

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: TIMESTEP =====

Timestep,

4; !- Number of Timesteps per Hour

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: RUNPERIOD =====

```

RunPeriod,
  SimulatioPeriod,    !- Name
  1,                  !- Begin Month
  1,                  !- Begin Day of Month
  12,                 !- End Month
  31,                 !- End Day of Month
  Monday,             !- Day of Week for Start Day
  No,                 !- Use Weather File Holidays and Special Days
  No,                 !- Use Weather File Daylight Saving Period
  No,                 !- Apply Weekend Holiday Rule
  No,                 !- Use Weather File Rain Indicators
  No,                 !- Use Weather File Snow Indicators
  1;                  !- Number of Times Runperiod to be Repeated

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WEATHERPROPERTY:SKYTEMPERATURE =====

```

WeatherProperty:SkyTemperature,
  SimulatioPeriod,    !- Name
  DifferenceScheduleDryBulbValue, !- Calculation Type
  AlwaysZero;         !- Schedule Name

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SITE:GROUNDREFLECTANCE =====

```

Site:GroundReflectance,
  0.369,              !- January Ground Reflectance {dimensionless}
  0.37,               !- February Ground Reflectance {dimensionless}
  0.501,              !- March Ground Reflectance {dimensionless}
  0.28,               !- April Ground Reflectance {dimensionless}
  0.272,              !- May Ground Reflectance {dimensionless}
  0.27,               !- June Ground Reflectance {dimensionless}
  0.217,              !- July Ground Reflectance {dimensionless}
  0.284,              !- August Ground Reflectance {dimensionless}
  0.275,              !- September Ground Reflectance {dimensionless}
  0.351,              !- October Ground Reflectance {dimensionless}
  0.257,              !- November Ground Reflectance {dimensionless}
  0.298;              !- December Ground Reflectance {dimensionless}

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SCHEDULETYPELIMITS =====

```

ScheduleTypeLimits,
  T-Limits,           !- Name
  ,                   !- Lower Limit Value
  ,                   !- Upper Limit Value
  Continuous;         !- Numeric Type

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SCHEDULE:COMPACT =====

```

Schedule:Compact,
  HeatSPintermittent, !- Name
  T-Limits,           !- Schedule Type Limits Name
  Through: 3/24,      !- Field 1
  For: Weekends,      !- Field 2
  Until: 24:00,       !- Field 3
  -100,               !- Field 4
  For: AllOtherDays,  !- Field 5
  Until: 7:00,        !- Field 6
  -100,               !- Field 7
  Until: 17:00,       !- Field 8

```

20, !- Field 9
 Until: 24:00, !- Field 10
 -100, !- Field 11
 Through: 10/20, !- Field 12
 For: Weekends, !- Field 13
 Until: 24:00, !- Field 14
 -100, !- Field 15
 For: AllOtherDays, !- Field 16
 Until: 6:00, !- Field 17
 -100, !- Field 18
 Until: 16:00, !- Field 19
 20, !- Field 20
 Until: 24:00, !- Field 21
 -100, !- Field 22
 Through: 12/31, !- Field 23
 For: Weekends, !- Field 24
 Until: 24:00, !- Field 25
 -100, !- Field 26
 For: AllOtherDays, !- Field 27
 Until: 7:00, !- Field 28
 -100, !- Field 29
 Until: 17:00, !- Field 30
 20, !- Field 31
 Until: 24:00, !- Field 32
 -100; !- Field 33

Schedule:Compact,

CoolSPintermittent, !- Name
 T-Limits, !- Schedule Type Limits Name
 Through: 3/24, !- Field 1
 For: Weekends, !- Field 2
 Until: 24:00, !- Field 3
 100, !- Field 4
 For: AllOtherDays, !- Field 5
 Until: 7:00, !- Field 6
 100, !- Field 7
 Until: 17:00, !- Field 8
 26, !- Field 9
 Until: 24:00, !- Field 10
 100, !- Field 11
 Through: 10/20, !- Field 12
 For: Weekends, !- Field 13
 Until: 24:00, !- Field 14
 100, !- Field 15
 For: AllOtherDays, !- Field 16
 Until: 6:00, !- Field 17
 100, !- Field 18
 Until: 16:00, !- Field 19
 26, !- Field 20
 Until: 24:00, !- Field 21
 100, !- Field 22
 Through: 12/31, !- Field 23
 For: Weekends, !- Field 24
 Until: 24:00, !- Field 25
 100, !- Field 26
 For: AllOtherDays, !- Field 27
 Until: 7:00, !- Field 28
 100, !- Field 29
 Until: 17:00, !- Field 30
 26, !- Field 31
 Until: 24:00, !- Field 32
 100; !- Field 33

```

Schedule:Compact,
  8-18 Weekdays,      !- Name
  T-Limits,           !- Schedule Type Limits Name
  Through: 3/24,      !- Field 1
  For: Weekends,      !- Field 2
  Until: 24:00,       !- Field 3
  0,                  !- Field 4
  For: AllOtherDays,  !- Field 5
  Until: 7:00,        !- Field 6
  0,                  !- Field 7
  Until: 17:00,       !- Field 8
  1,                  !- Field 9
  Until: 24:00,       !- Field 10
  0,                  !- Field 11
  Through: 10/20,     !- Field 12
  For: Weekends,     !- Field 13
  Until: 24:00,       !- Field 14
  0,                  !- Field 15
  For: AllOtherDays,  !- Field 16
  Until: 6:00,        !- Field 17
  0,                  !- Field 18
  Until: 16:00,       !- Field 19
  1,                  !- Field 20
  Until: 24:00,       !- Field 21
  0,                  !- Field 22
  Through: 12/31,    !- Field 23
  For: Weekends,     !- Field 24
  Until: 24:00,       !- Field 25
  0,                  !- Field 26
  For: AllOtherDays,  !- Field 27
  Until: 7:00,        !- Field 28
  0,                  !- Field 29
  Until: 17:00,       !- Field 30
  1,                  !- Field 31
  Until: 24:00,       !- Field 32
  0;                  !- Field 33

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SCHEDULE:CONSTANT =====

```

Schedule:Constant,
  AlwaysZero,         !- Name
  T-Limits,           !- Schedule Type Limits Name
  0;                  !- Hourly Value

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL =====

```

Material,
  outer layer,        !- Name
  MediumRough,        !- Roughness
  0.115,              !- Thickness {m}
  0.99,               !- Conductivity {W/m-K}
  1800,               !- Density {kg/m3}
  850,                !- Specific Heat {J/kg-K}
  ,                   !- Thermal Absorptance
  0.6;                !- Solar Absorptance

```

```

Material,
  insulating layer,   !- Name
  MediumSmooth,       !- Roughness

```

0.06, !- Thickness {m}
0.04, !- Conductivity {W/m-K}
30, !- Density {kg/m3}
850; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,

masonry, !- Name
MediumRough, !- Roughness
0.175, !- Thickness {m}
0.79, !- Conductivity {W/m-K}
1600, !- Density {kg/m3}
850; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,

internal plastering, !- Name
MediumSmooth, !- Roughness
0.015, !- Thickness {m}
0.7, !- Conductivity {W/m-K}
1400, !- Density {kg/m3}
850, !- Specific Heat {J/kg-K}
, !- Thermal Absorptance
0.6; !- Solar Absorptance

Material,

gypsum plaster, !- Name
MediumRough, !- Roughness
0.12, !- Thickness {m}
0.21, !- Conductivity {W/m-K}
900, !- Density {kg/m3}
850, !- Specific Heat {J/kg-K}
, !- Thermal Absorptance
0.6; !- Solar Absorptance

Material,

mineral wool 01-30, !- Name
MediumRough, !- Roughness
0.1, !- Thickness {m}
0.04, !- Conductivity {W/m-K}
30, !- Density {kg/m3}
850; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,

plastic covering, !- Name
Smooth, !- Roughness
0.004, !- Thickness {m}
0.23, !- Conductivity {W/m-K}
1500, !- Density {kg/m3}
1500, !- Specific Heat {J/kg-K}
, !- Thermal Absorptance
0.9; !- Solar Absorptance

Material,

cement floor, !- Name
MediumSmooth, !- Roughness
0.06, !- Thickness {m}
1.4, !- Conductivity {W/m-K}
2000, !- Density {kg/m3}
850; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,

mineral wool 004, !- Name
MediumRough, !- Roughness

0.04, !- Thickness {m}
0.04, !- Conductivity {W/m-K}
50, !- Density {kg/m3}
850; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,

concrete 018, !- Name
MediumRough, !- Roughness
0.18, !- Thickness {m}
2.1, !- Conductivity {W/m-K}
2400, !- Density {kg/m3}
850; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,

mineral wool 01-50, !- Name
MediumRough, !- Roughness
0.1, !- Thickness {m}
0.04, !- Conductivity {W/m-K}
50, !- Density {kg/m3}
850; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,

acoustic board, !- Name
MediumRough, !- Roughness
0.02, !- Thickness {m}
0.06, !- Conductivity {W/m-K}
400, !- Density {kg/m3}
840; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,

rain protection, !- Name
MediumSmooth, !- Roughness
0.004, !- Thickness {m}
0.23, !- Conductivity {W/m-K}
1500, !- Density {kg/m3}
1300, !- Specific Heat {J/kg-K}
, !- Thermal Absorptance
0.9; !- Solar Absorptance

Material,

insulating, !- Name
MediumRough, !- Roughness
0.08, !- Thickness {m}
0.04, !- Conductivity {W/m-K}
50, !- Density {kg/m3}
850; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,

concrete 02, !- Name
Rough, !- Roughness
0.2, !- Thickness {m}
2.1, !- Conductivity {W/m-K}
2400, !- Density {kg/m3}
850; !- Specific Heat {J/kg-K}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWMATERIAL:SIMPLEGLAZINGSYSTEM
=====

WindowMaterial:SimpleGlazingSystem,

DPwithShading, !- Name
2.37, !- U-Factor {W/m2-K}

0.2; !- Solar Heat Gain Coefficient

WindowMaterial:SimpleGlazingSystem,
DPwoShading, !- Name
2.93, !- U-Factor {W/m2-K}
0.77; !- Solar Heat Gain Coefficient

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWMATERIAL:SHADE =====

WindowMaterial:Shade,
Solar to Air Factor, !- Name
0.9, !- Solar Transmittance
0, !- Solar Reflectance
0.9, !- Visible Transmittance
0, !- Visible Reflectance
0.000000001, !- Thermal Hemispherical Emissivity
0.9, !- Thermal Transmittance
0.000001, !- Thickness {m}
100000, !- Conductivity {W/m-K}
1, !- Shade to Glass Distance {m}
1, !- Top Opening Multiplier
1, !- Bottom Opening Multiplier
1, !- Left-Side Opening Multiplier
1, !- Right-Side Opening Multiplier
0.8; !- Airflow Permeability

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: CONSTRUCTION =====

Construction,
Type 1 (external wall), !- Name
outer layer, !- Outside Layer
insulating layer, !- Layer 2
masonry, !- Layer 3
internal plastering; !- Layer 4

Construction,
Type 2 (internall wall), !- Name
gypsum plaster, !- Outside Layer
mineral wool 01-30, !- Layer 2
gypsum plaster; !- Layer 3

Construction,
Type 3c (ceiling), !- Name
plastic covering, !- Outside Layer
cement floor, !- Layer 2
mineral wool 004, !- Layer 3
concrete 018; !- Layer 4

Construction,
Type 3f (floor), !- Name
concrete 018, !- Outside Layer
mineral wool 004, !- Layer 2
cement floor, !- Layer 3
plastic covering; !- Layer 4

Construction,
Type 4c (ceiling/roof), !- Name
plastic covering, !- Outside Layer
cement floor, !- Layer 2
mineral wool 004, !- Layer 3

concrete 018, !- Layer 4
mineral wool 01-50, !- Layer 5
acoustic board; !- Layer 6

Construction,
 Type 4f (floor), !- Name
 acoustic board, !- Outside Layer
 mineral wool 01-50, !- Layer 2
 concrete 018, !- Layer 3
 mineral wool 004, !- Layer 4
 cement floor, !- Layer 5
 plastic covering; !- Layer 6

Construction,
 Type 5 (roof), !- Name
 rain protection, !- Outside Layer
 insulating, !- Layer 2
 concrete 02; !- Layer 3

Construction,
 DP, !- Name
 DPwoShading; !- Outside Layer

Construction,
 Shaded DP, !- Name
 DPwithShading; !- Outside Layer

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: GLOBALGEOMETRYRULES =====

GlobalGeometryRules,
 UpperLeftCorner, !- Starting Vertex Position
 Counterclockwise, !- Vertex Entry Direction
 Relative, !- Coordinate System
 Relative, !- Daylighting Reference Point Coordinate System
 Relative; !- Rectangular Surface Coordinate System

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONE =====

Zone,
 Room, !- Name
 0, !- Direction of Relative North {deg}
 0, !- X Origin {m}
 0, !- Y Origin {m}
 0, !- Z Origin {m}
 1, !- Type
 1, !- Multiplier
 autocalculate, !- Ceiling Height {m}
 autocalculate, !- Volume {m3}
 , !- Zone Inside Convection Algorithm
 , !- Zone Outside Convection Algorithm
 Yes; !- Part of Total Floor Area

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: BUILDINGSURFACE:DETAILED =====

BuildingSurface:Detailed,
 Floor, !- Name
 Floor, !- Surface Type
 Type 4f (floor), !- Construction Name
 Room, !- Zone Name

Adiabatic, !- Outside Boundary Condition
 , !- Outside Boundary Condition Object
 NoSun, !- Sun Exposure
 NoWind, !- Wind Exposure
 autocalculate, !- View Factor to Ground
 autocalculate, !- Number of Vertices
 0, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
 0, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
 0, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
 0, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
 3.6, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
 0, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
 5.5, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
 3.6, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
 0, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
 5.5, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
 0, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
 0; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,

External Wall, !- Name
 Wall, !- Surface Type
 Type 1 (external wall), !- Construction Name
 Room, !- Zone Name
 Outdoors, !- Outside Boundary Condition
 , !- Outside Boundary Condition Object
 SunExposed, !- Sun Exposure
 NoWind, !- Wind Exposure
 autocalculate, !- View Factor to Ground
 autocalculate, !- Number of Vertices
 0, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
 3.6, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
 2.8, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
 0, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
 3.6, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
 0, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
 0, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
 2.5, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
 0, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
 0, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
 2.5, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
 2.8; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,

Internal Wall Left, !- Name
 Wall, !- Surface Type
 Type 2 (internall wall), !- Construction Name
 Room, !- Zone Name
 Adiabatic, !- Outside Boundary Condition
 , !- Outside Boundary Condition Object
 NoSun, !- Sun Exposure
 NoWind, !- Wind Exposure
 autocalculate, !- View Factor to Ground
 autocalculate, !- Number of Vertices
 0, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
 0, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
 2.8, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
 0, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
 0, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
 0, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
 5.5, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
 0, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}

0, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
5.5, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
0, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.8; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,

Internal Wall Right, !- Name
Wall, !- Surface Type
Type 2 (internall wall), !- Construction Name
Room, !- Zone Name
Adiabatic, !- Outside Boundary Condition
, !- Outside Boundary Condition Object
NoSun, !- Sun Exposure
NoWind, !- Wind Exposure
autocalculate, !- View Factor to Ground
autocalculate, !- Number of Vertices
5.5, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
3.6, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.8, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
5.5, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
3.6, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
0, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
0, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
3.6, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
0, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
0, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
3.6, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.8; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,

Internal Wall Back, !- Name
Wall, !- Surface Type
Type 2 (internall wall), !- Construction Name
Room, !- Zone Name
Adiabatic, !- Outside Boundary Condition
, !- Outside Boundary Condition Object
NoSun, !- Sun Exposure
NoWind, !- Wind Exposure
autocalculate, !- View Factor to Ground
autocalculate, !- Number of Vertices
5.5, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
0, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.8, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
5.5, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
0, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
0, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
5.5, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
3.6, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
0, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
5.5, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
3.6, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.8; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,

External Window Wall, !- Name
Wall, !- Surface Type
Type 1 (external wall), !- Construction Name
Room, !- Zone Name
Outdoors, !- Outside Boundary Condition
, !- Outside Boundary Condition Object
SunExposed, !- Sun Exposure
NoWind, !- Wind Exposure

autocalculate, !- View Factor to Ground
autocalculate, !- Number of Vertices
0, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
2.5, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.800001, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
0, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
2.5, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
0, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
0, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
0, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
0, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
0, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
0, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.800001; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,

Ceiling, !- Name
Ceiling, !- Surface Type
Type 4c (ceiling/roof), !- Construction Name
Room, !- Zone Name
Adiabatic, !- Outside Boundary Condition
, !- Outside Boundary Condition Object
NoSun, !- Sun Exposure
NoWind, !- Wind Exposure
autocalculate, !- View Factor to Ground
autocalculate, !- Number of Vertices
0, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
0, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.8, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
5.5, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
0, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
2.8, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
5.5, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
3.6, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
2.8, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
0, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
3.6, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.8; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOW =====

Window,

Window Glazing, !- Name
Shaded DP, !- Construction Name
External Window Wall, !- Building Surface Name
SolarToAir, !- Shading Control Name
, !- Frame and Divider Name
1, !- Multiplier
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
2.5, !- Length {m}
2.8; !- Height {m}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWPROPERTY:SHADINGCONTROL =====

WindowProperty:ShadingControl,

SolarToAir, !- Name
InteriorShade, !- Shading Type
, !- Construction with Shading Name
AlwaysOn, !- Shading Control Type

, !- Schedule Name
 , !- Setpoint { W/m2, W or deg C }
 No, !- Shading Control Is Scheduled
 No, !- Glare Control Is Active
 Solar to Air Factor, !- Shading Device Material Name
 , !- Type of Slat Angle Control for Blinds
 ; !- Slat Angle Schedule Name

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SURFACEPROPERTY:OTHERSIDECOEFFICIENTS
 =====

SurfaceProperty:OtherSideCoefficients,
 OutdoorFixedCoeff, !- Name
 23, !- Combined Convective/Radiative Film Coefficient { W/m2-K }
 , !- Constant Temperature { C }
 , !- Constant Temperature Coefficient
 1, !- External Dry-Bulb Temperature Coefficient
 , !- Ground Temperature Coefficient
 , !- Wind Speed Coefficient
 , !- Zone Air Temperature Coefficient
 , !- Constant Temperature Schedule Name
 No, !- Sinusoidal Variation of Constant Temperature Coefficient
 24; !- Period of Sinusoidal Variation { hr }

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SURFACEPROPERTY:CONVECTIONCOEFFICIENTS
 =====

SurfaceProperty:ConvectionCoefficients,
 Floor, !- Surface Name
 Inside, !- Convection Coefficient 1 Location
 Value, !- Convection Coefficient 1 Type
 2.5; !- Convection Coefficient 1 { W/m2-K }

SurfaceProperty:ConvectionCoefficients,
 Ceiling, !- Surface Name
 Inside, !- Convection Coefficient 1 Location
 Value, !- Convection Coefficient 1 Type
 2.5; !- Convection Coefficient 1 { W/m2-K }

SurfaceProperty:ConvectionCoefficients,
 Internal Wall Left, !- Surface Name
 Inside, !- Convection Coefficient 1 Location
 Value, !- Convection Coefficient 1 Type
 2.5; !- Convection Coefficient 1 { W/m2-K }

SurfaceProperty:ConvectionCoefficients,
 Internal Wall Right, !- Surface Name
 Inside, !- Convection Coefficient 1 Location
 Value, !- Convection Coefficient 1 Type
 2.5; !- Convection Coefficient 1 { W/m2-K }

SurfaceProperty:ConvectionCoefficients,
 Internal Wall Back, !- Surface Name
 Inside, !- Convection Coefficient 1 Location
 Value, !- Convection Coefficient 1 Type
 2.5; !- Convection Coefficient 1 { W/m2-K }

SurfaceProperty:ConvectionCoefficients,
 External Wall, !- Surface Name
 Inside, !- Convection Coefficient 1 Location

Value, !- Convection Coefficient 1 Type
 2.5, !- Convection Coefficient 1 {W/m2-K}
 , !- Convection Coefficient 1 Schedule Name
 , !- Convection Coefficient 1 User Curve Name
 Outside, !- Convection Coefficient 2 Location
 Value, !- Convection Coefficient 2 Type
 17.5; !- Convection Coefficient 2 {W/m2-K}

SurfaceProperty:ConvectionCoefficients,

External Window Wall, !- Surface Name
 Inside, !- Convection Coefficient 1 Location
 Value, !- Convection Coefficient 1 Type
 2.5, !- Convection Coefficient 1 {W/m2-K}
 , !- Convection Coefficient 1 Schedule Name
 , !- Convection Coefficient 1 User Curve Name
 Outside, !- Convection Coefficient 2 Location
 Value, !- Convection Coefficient 2 Type
 17.5; !- Convection Coefficient 2 {W/m2-K}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OTHEREQUIPMENT =====

OtherEquipment,

OE Test1, !- Name
 Room, !- Zone Name
 8-18 Weekdays, !- Schedule Name
 Watts/Area, !- Design Level Calculation Method
 , !- Design Level {W}
 20, !- Watts per Zone Floor Area {W/m2}
 , !- Watts per Person {W/Person}
 0, !- Fraction Latent
 0, !- Fraction Radiant
 0; !- Fraction Lost

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONEINFILTRATION:DESIGNFLOWRATE =====

ZoneInfiltration:DesignFlowRate,

Ventilation Test1, !- Name
 Room, !- Zone or ZoneList Name
 8-18 Weekdays, !- Schedule Name
 AirChanges/Hour, !- Design Flow Rate Calculation Method
 , !- Design Flow Rate {m3/s}
 , !- Flow per Zone Floor Area {m3/s-m2}
 , !- Flow per Exterior Surface Area {m3/s-m2}
 1, !- Air Changes per Hour
 1, !- Constant Term Coefficient
 , !- Temperature Term Coefficient
 , !- Velocity Term Coefficient
 ; !- Velocity Squared Term Coefficient

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: HVACTEMPLATE:THERMOSTAT =====

HVACTemplate:Thermostat,

Thermostat, !- Name
 , !- Heating Setpoint Schedule Name
 20, !- Constant Heating Setpoint {C}
 , !- Cooling Setpoint Schedule Name
 26; !- Constant Cooling Setpoint {C}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: HVACTEMPLATE:ZONE:IDEALLOADSAIRSYSTEM
=====

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Room, !- Zone Name
Thermostat; !- Template Thermostat Name

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLEDICTIONARY =====

Output:VariableDictionary,
regular, !- Key Field
Name; !- Sort Option

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:SURFACES:DRAWING =====

Output:Surfaces:Drawing,
DXF, !- Report Type
RegularPolyline; !- Report Specifications 1

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:CONSTRUCTIONS =====

Output:Constructions,
Constructions, !- Details Type 1
Materials; !- Details Type 2

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:TABLE:SUMMARYREPORTS =====

Output:Table:SummaryReports,
AllSummary; !- Report 1 Name

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:TABLE:MONTHLY =====

Output:Table:Monthly,
Heating/Cooling Demand, !- Name
2, !- Digits After Decimal
Heating:DistrictHeating ,!- Variable or Meter 1 Name
SumOrAverage, !- Aggregation Type for Variable or Meter 1
Cooling:DistrictCooling ,!- Variable or Meter 2 Name
SumOrAverage; !- Aggregation Type for Variable or Meter 2

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUTCONTROL:TABLE:STYLE =====

OutputControl:Table:Style,
HTML, !- Column Separator
JtoKWH; !- Unit Conversion

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLE =====

Output:Variable,
*, !- Key Value
Outdoor Dry Bulb, !- Variable Name
Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
*, !- Key Value

Direct Solar, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
 *, !- Key Value
 Diffuse Solar, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
 *, !- Key Value
 Surface Ext Solar Incident, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
 *, !- Key Value
 Zone Mean Air Temperature, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
 *, !- Key Value
 Zone Operative Temperature, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
 *, !- Key Value
 Zone/Sys Sensible Heating Rate, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
 *, !- Key Value
 Zone/Sys Sensible Cooling Rate, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
 *, !- Key Value
 Ideal Loads Air Heating Rate, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
 *, !- Key Value
 Ideal Loads Air Total Cooling Rate, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
 *, !- Key Value
 Ideal Loads Air Sensible Cooling Rate, !- Variable Name
 Hourly; !- Reporting Frequency

B. Dettaglio dei dati di output per i test di validazione

Vengono qui riportati gli andamenti orari, mese per mese, delle temperature dell'aria e operanti e della domanda di riscaldamento e raffrescamento registrati nei 12 test del set n. 5, che ha dato esito positivo nella validazione. Tali grafici sono inclusi fra i risultati delle simulazioni elencati nella norma UNI EN 15265.

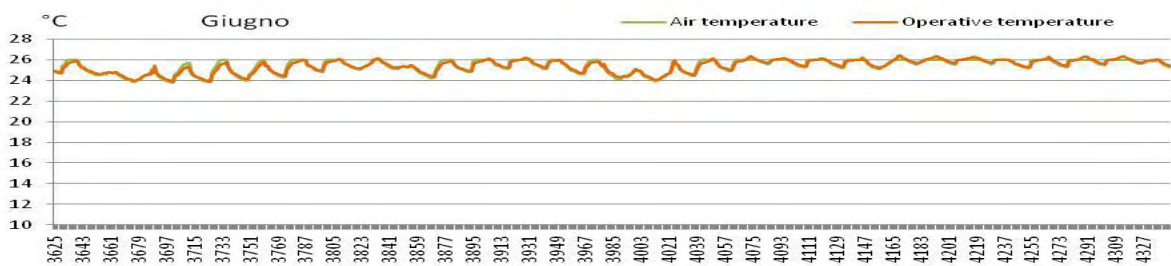
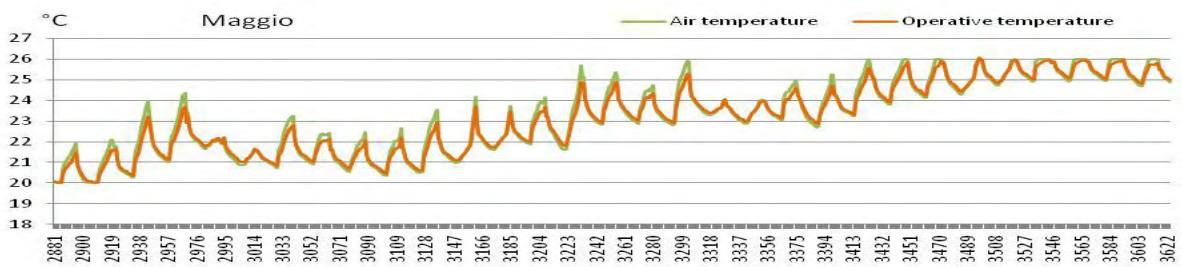
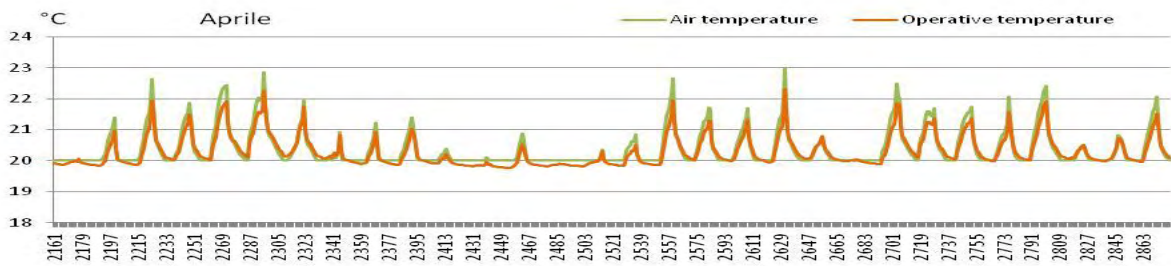
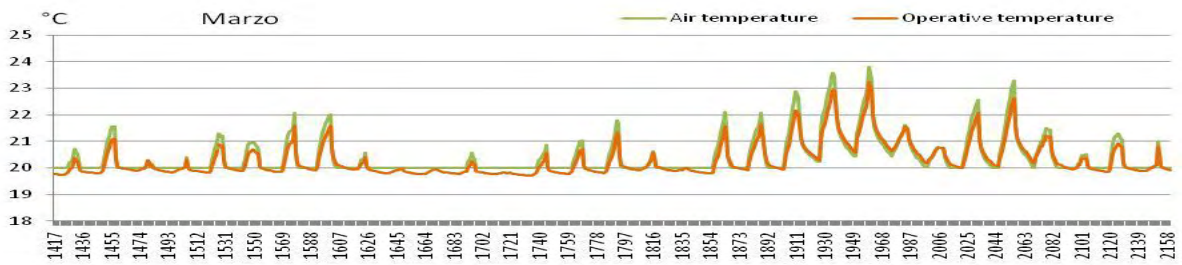
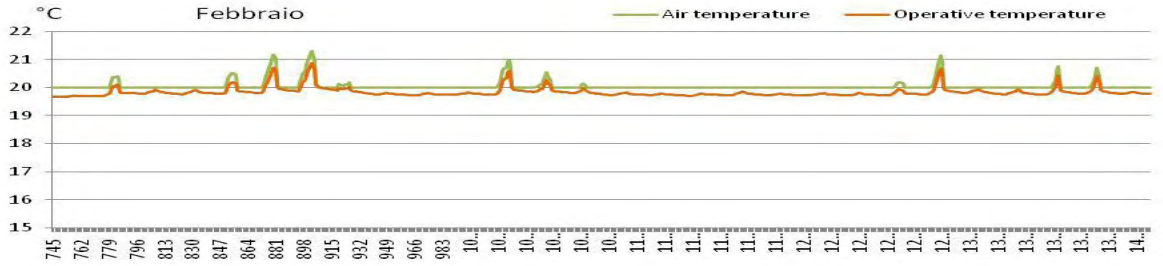
In particolare, ai dati richiesti dalla norma le variabili calcolate da EnergyPlus sono state associate nel seguente modo:

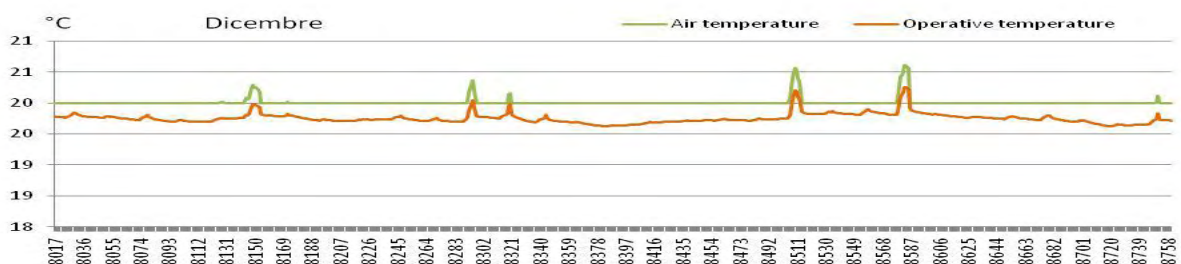
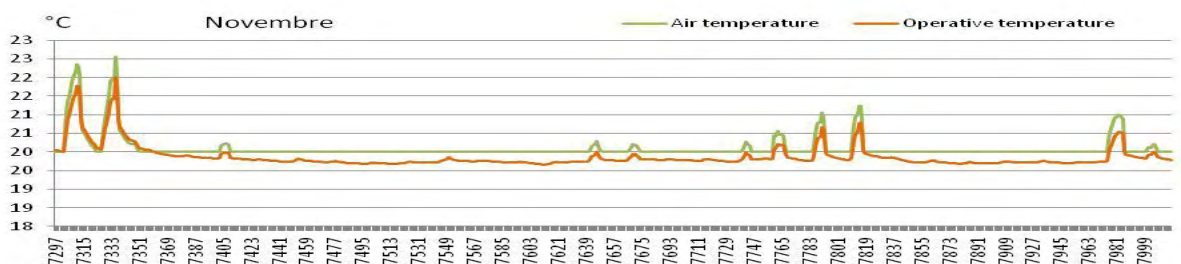
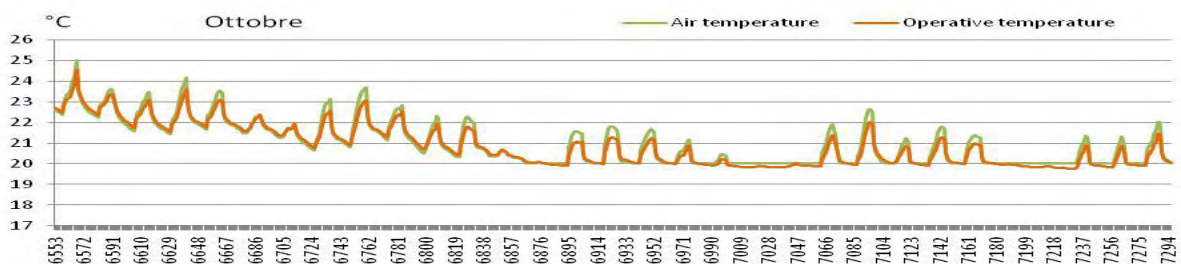
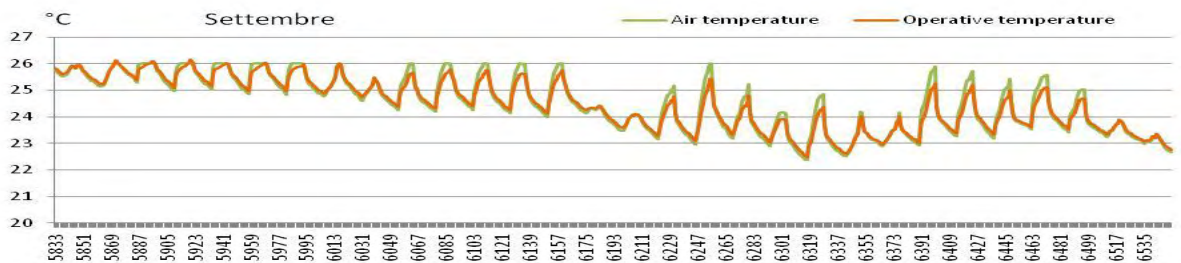
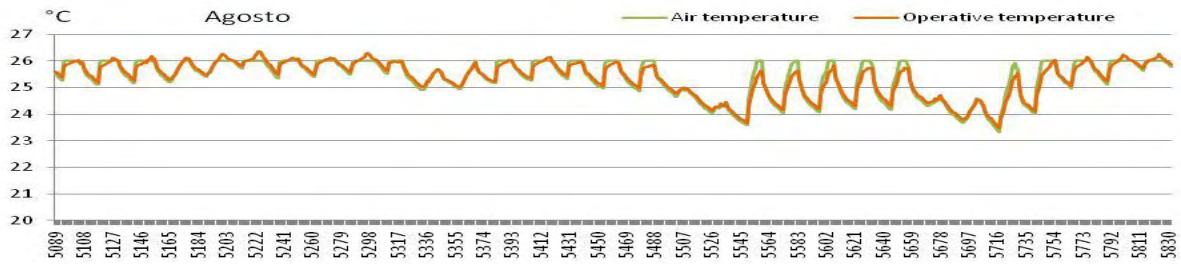
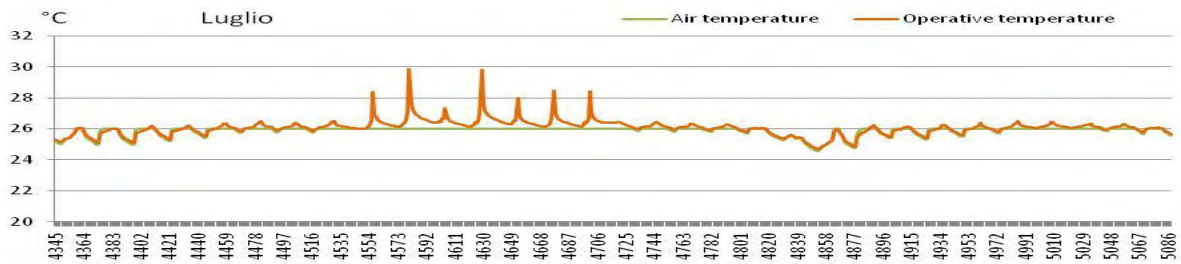
EN 15265

Energy Plus Variables

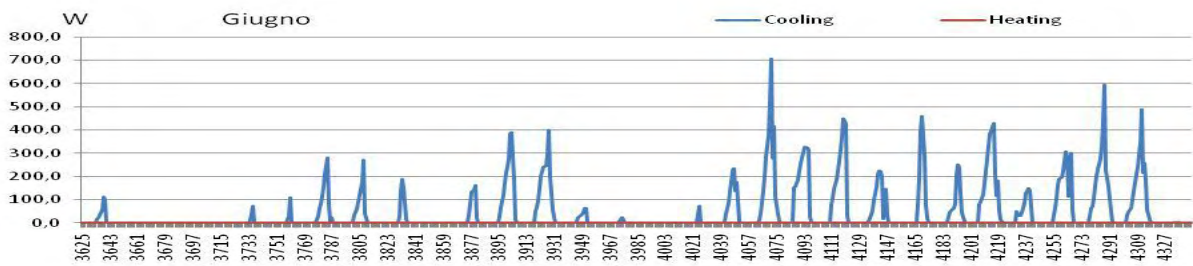
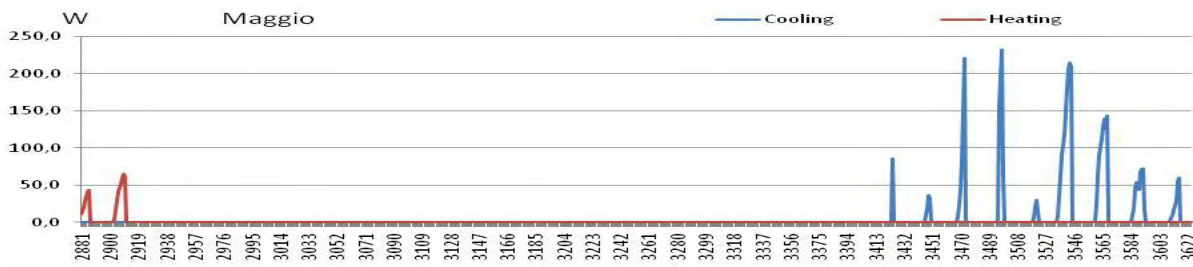
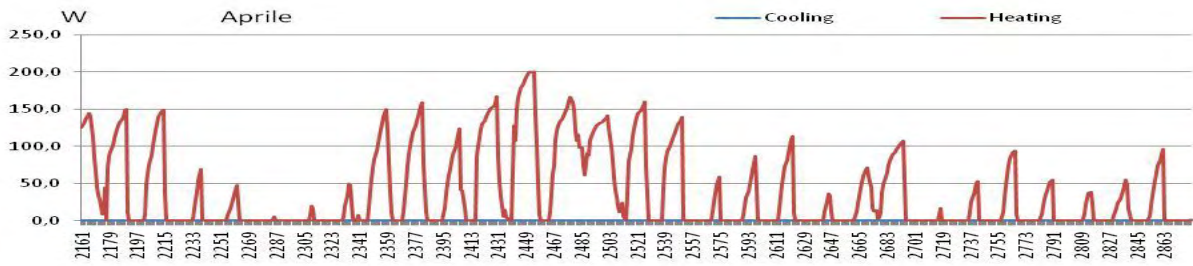
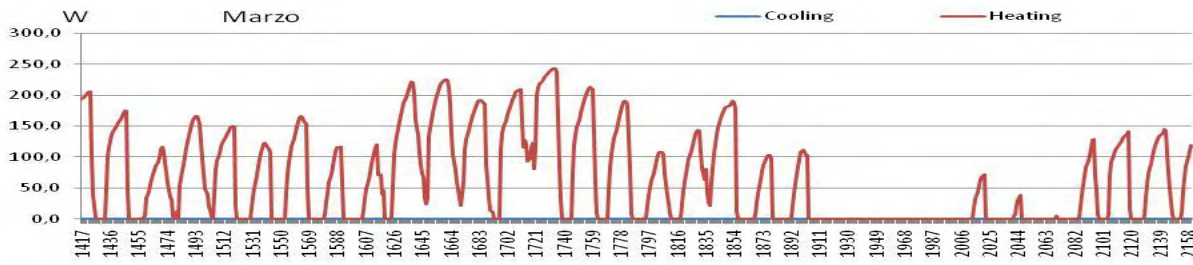
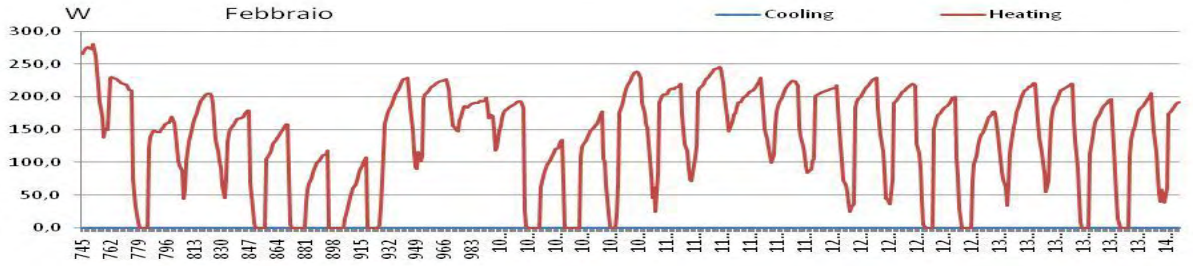
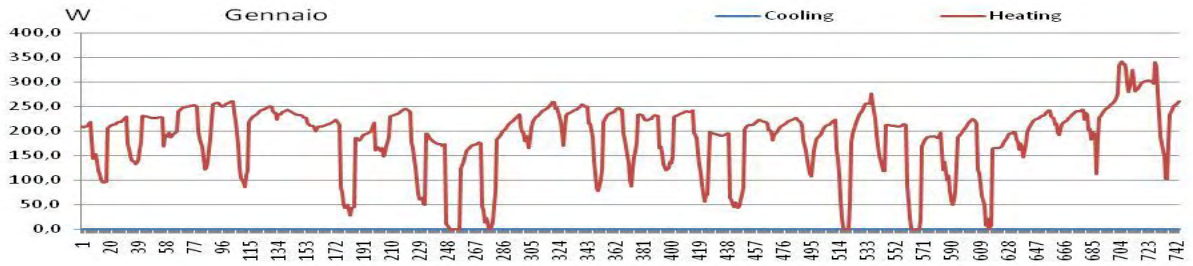
Internal air temperature	<i>Zone Mean Air Temperature</i>
Operative temperature	<i>Zone Operative Temperature</i>
Heating demand	<i>Ideal Loads Air Heating Rate</i>
Cooling demand	<i>Ideal Loads Air Cooling Rate</i>

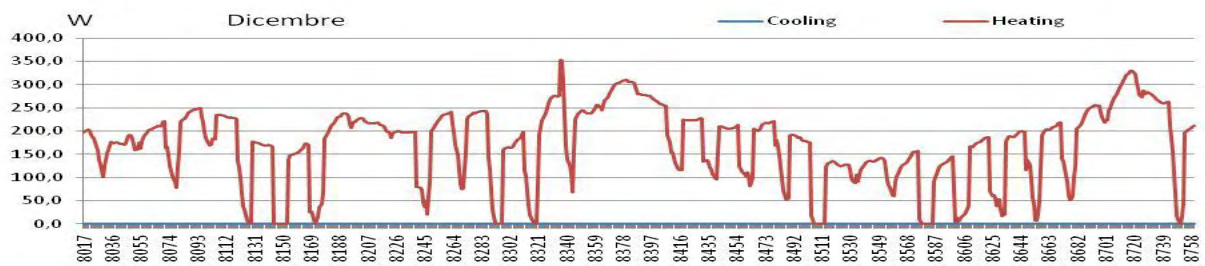
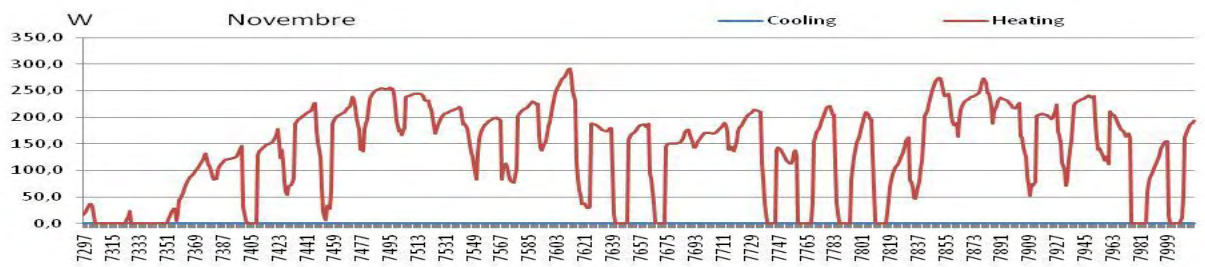
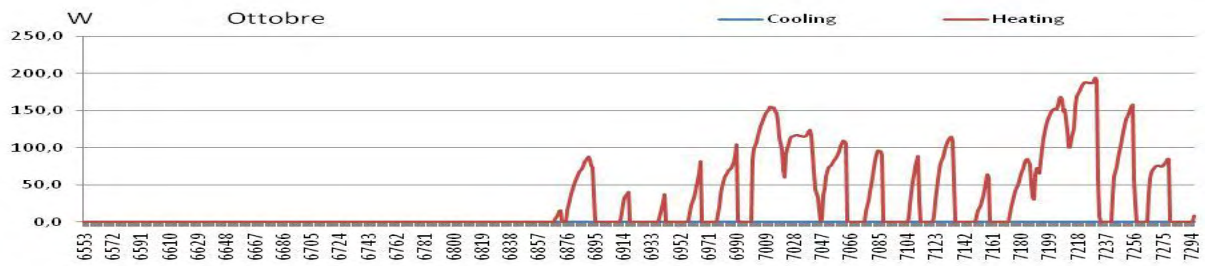
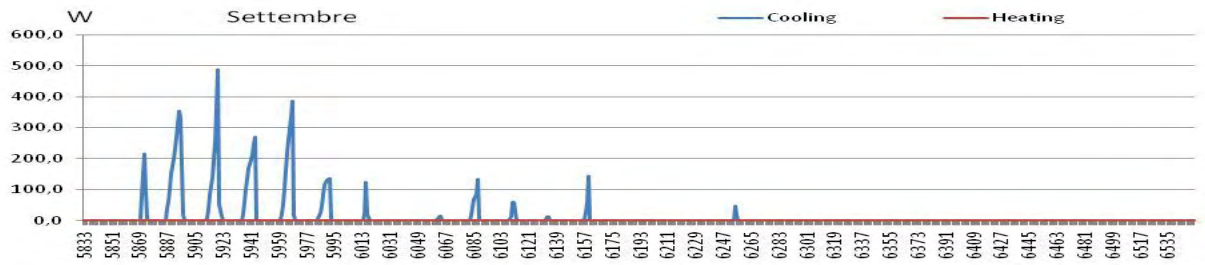
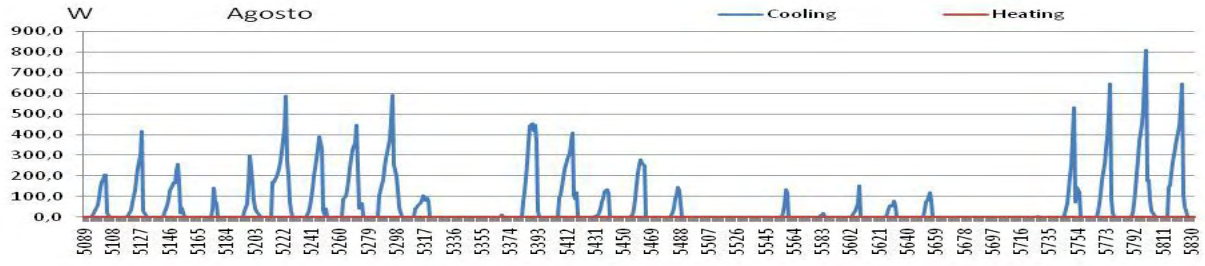
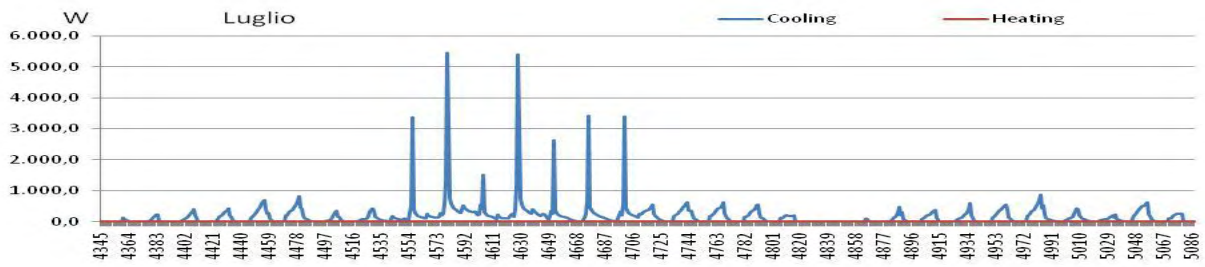
Temperature Test 2



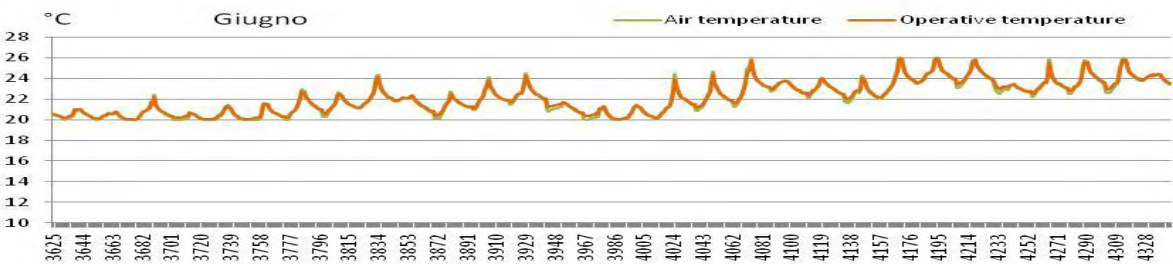
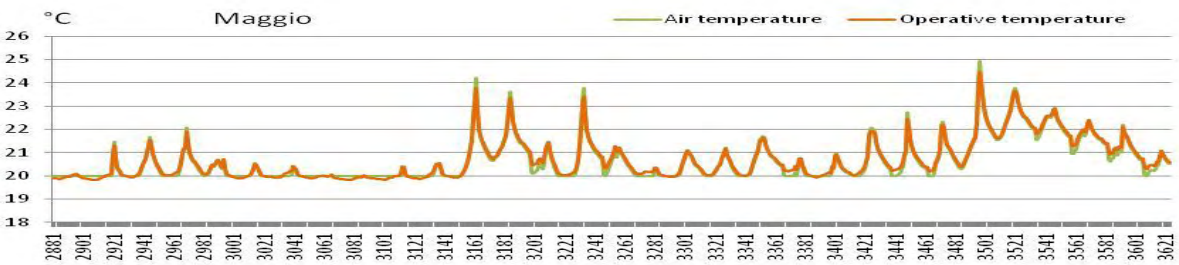
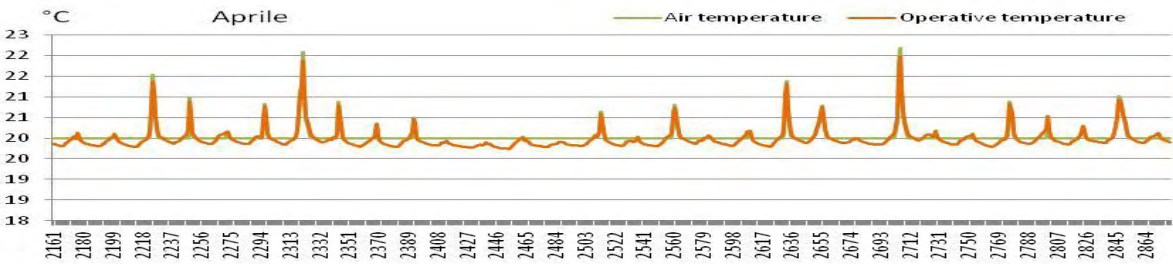
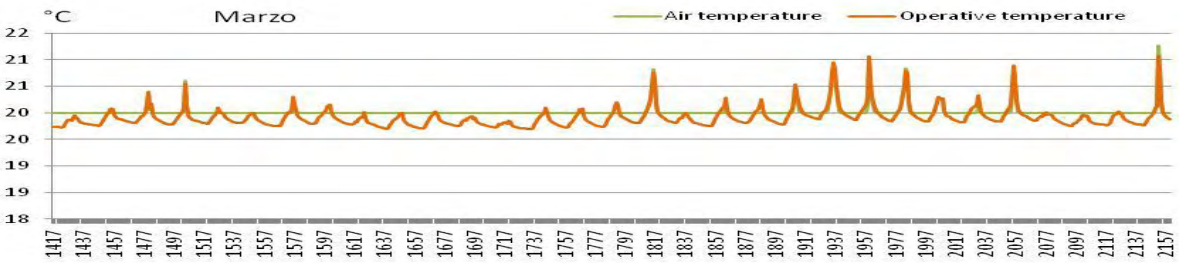
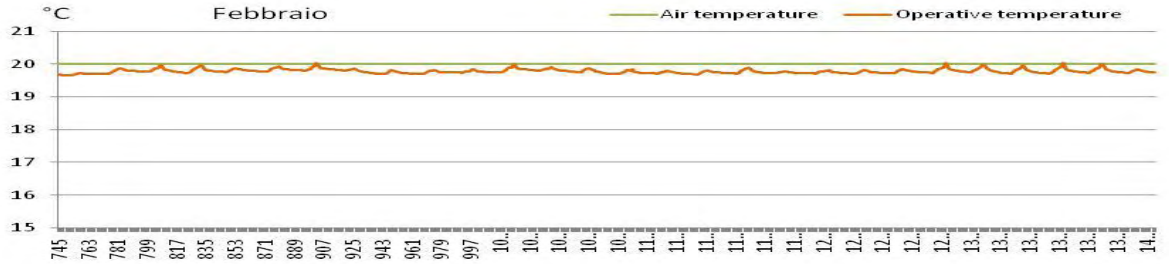


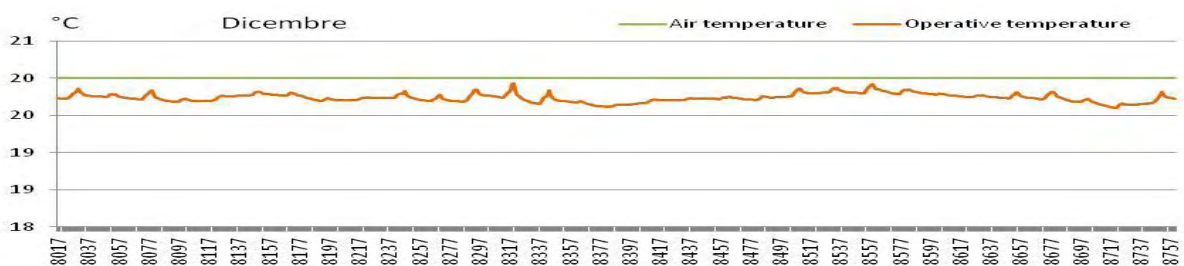
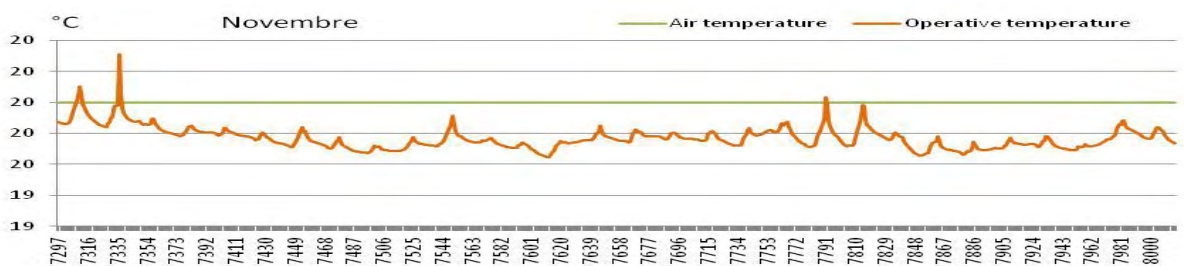
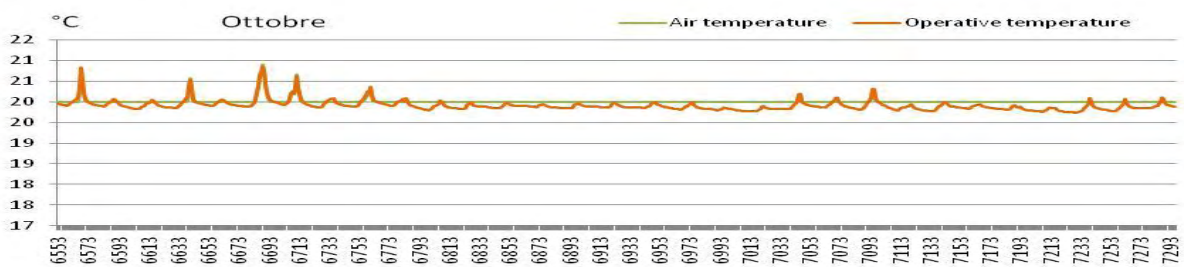
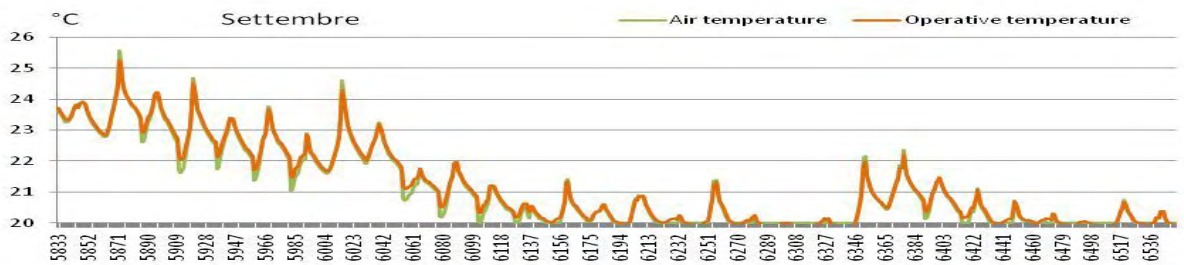
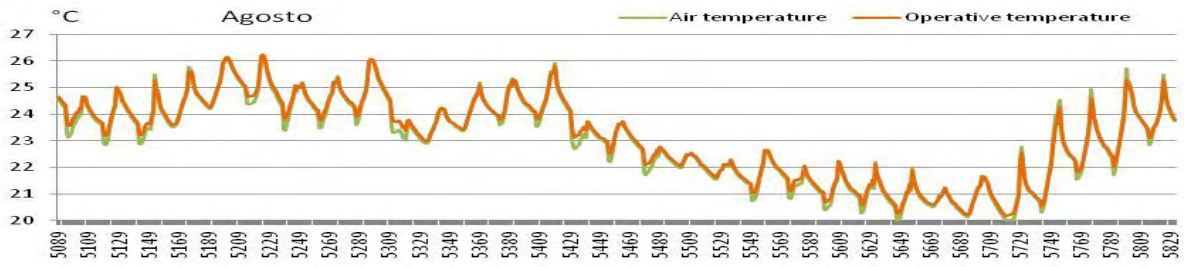
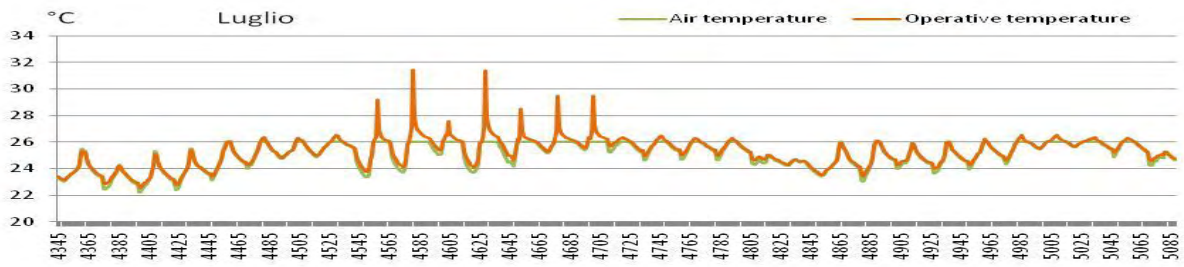
Domanda di climatizzazione Test 2



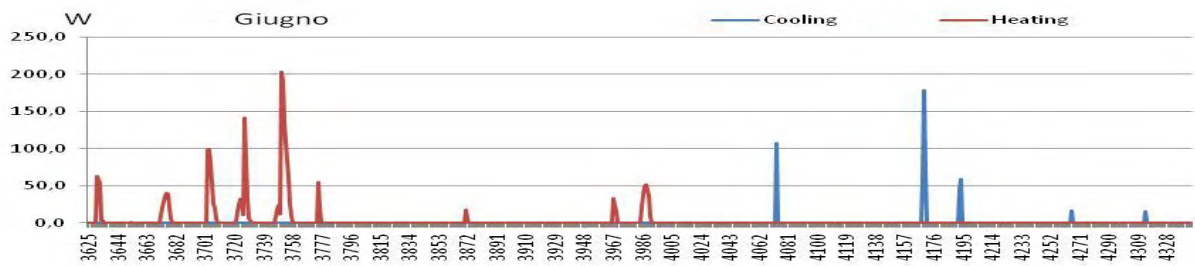
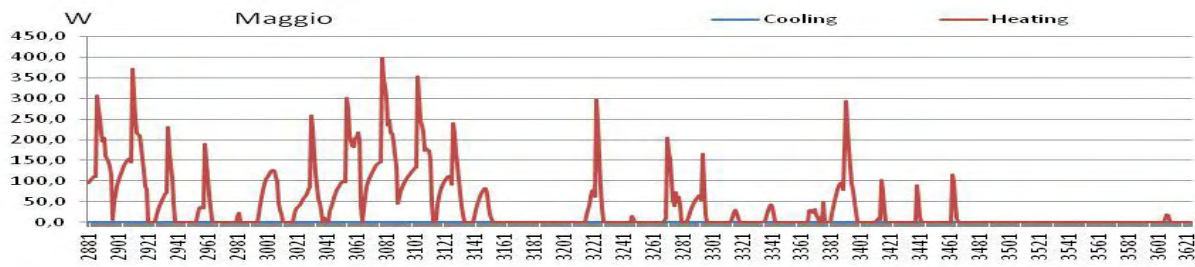
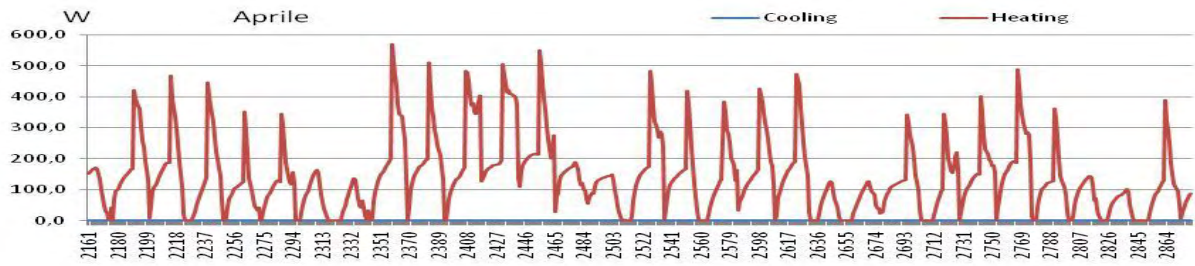
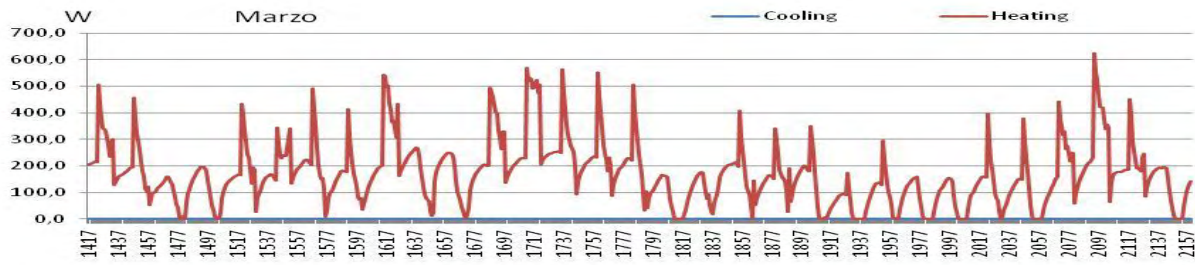
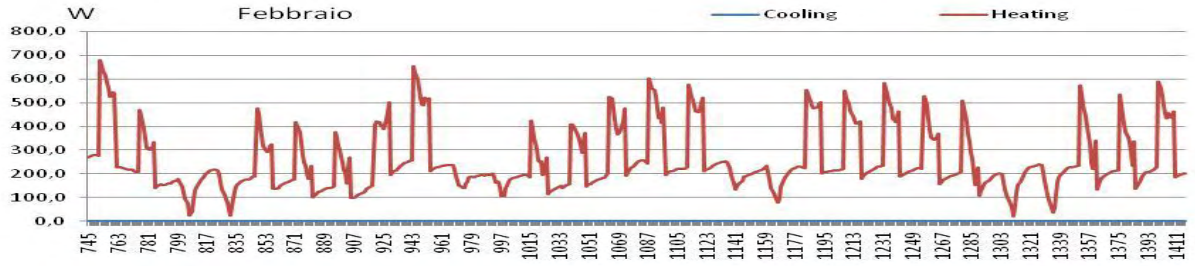
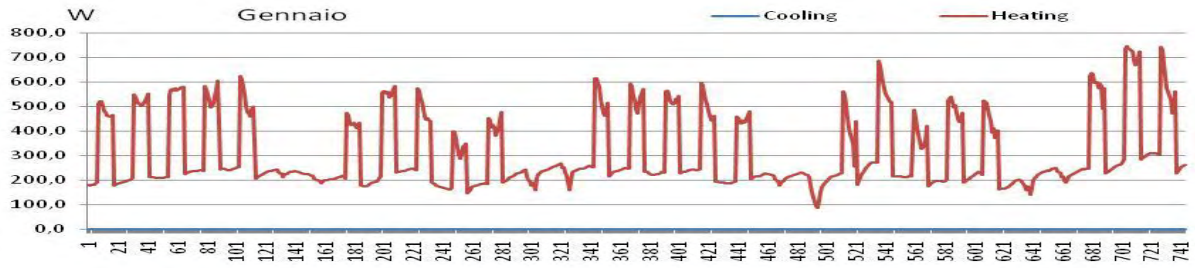


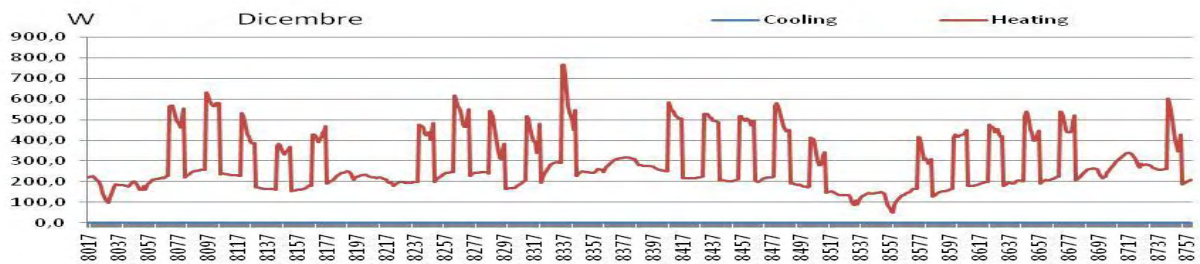
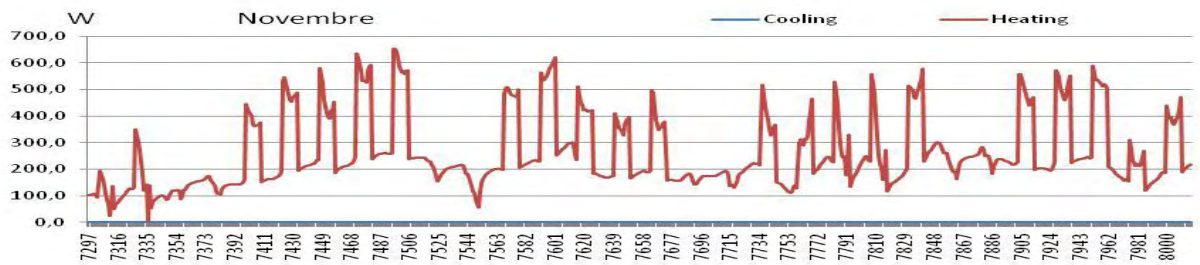
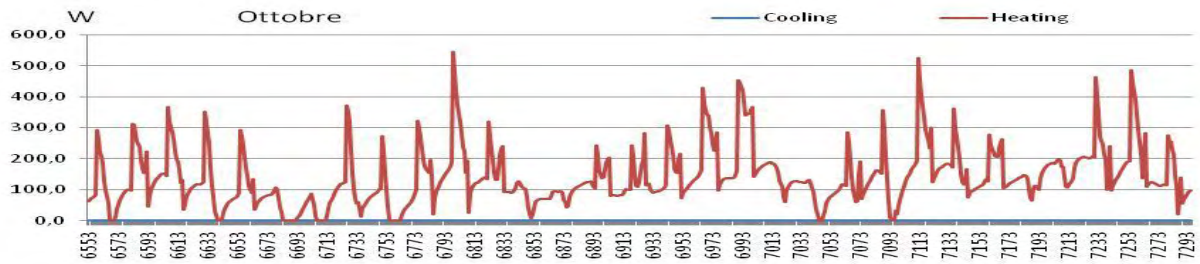
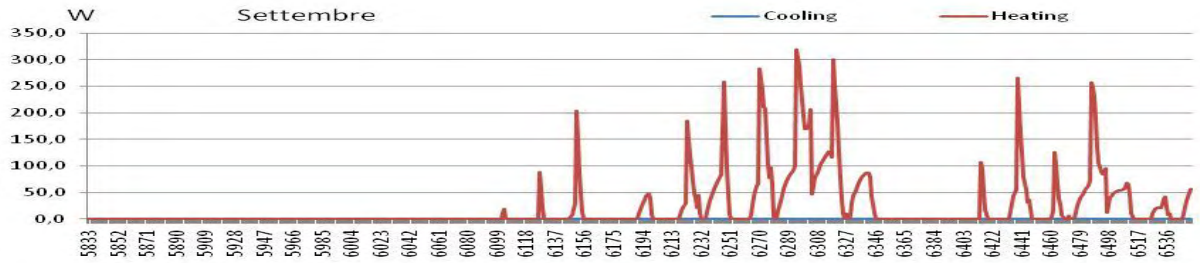
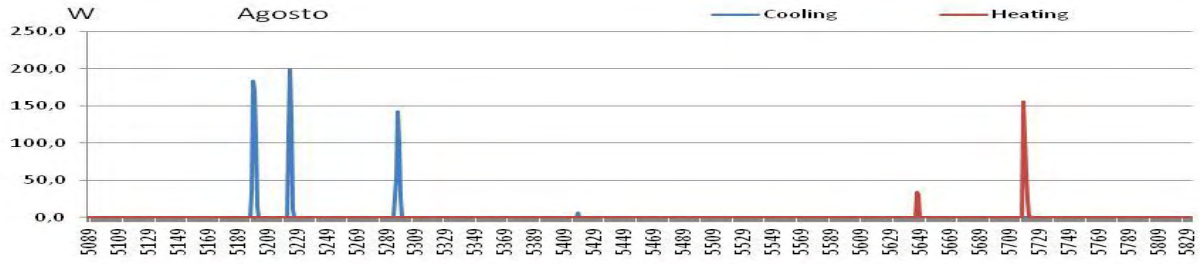
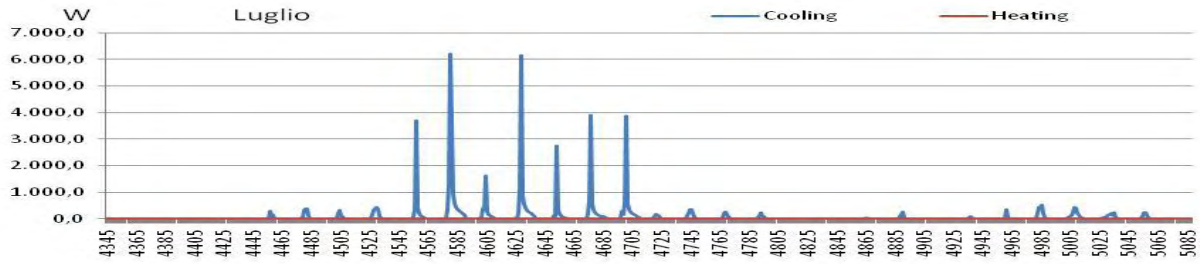
Temperature Test 3



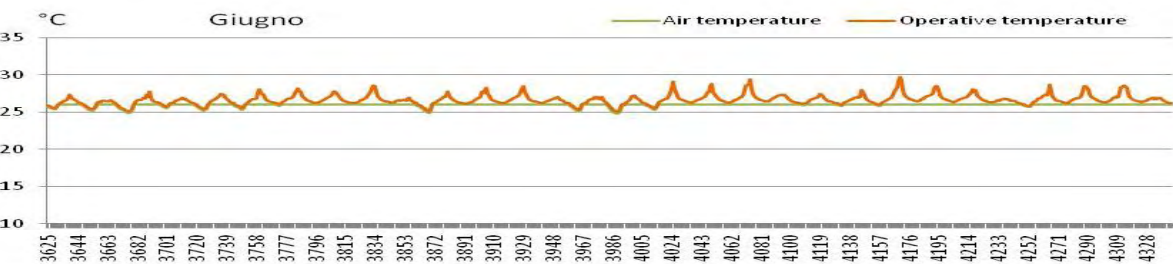
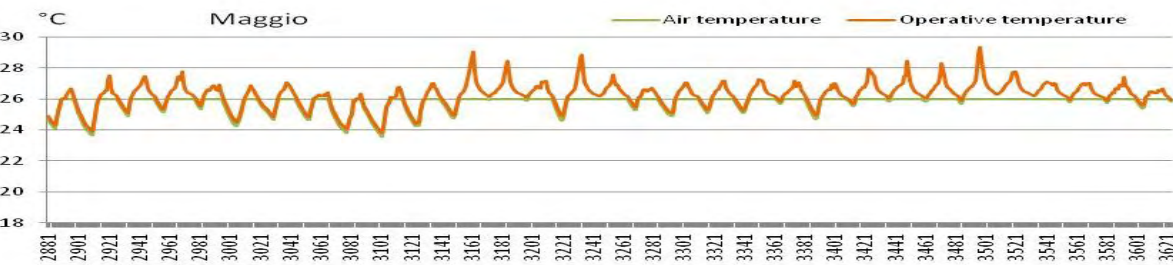
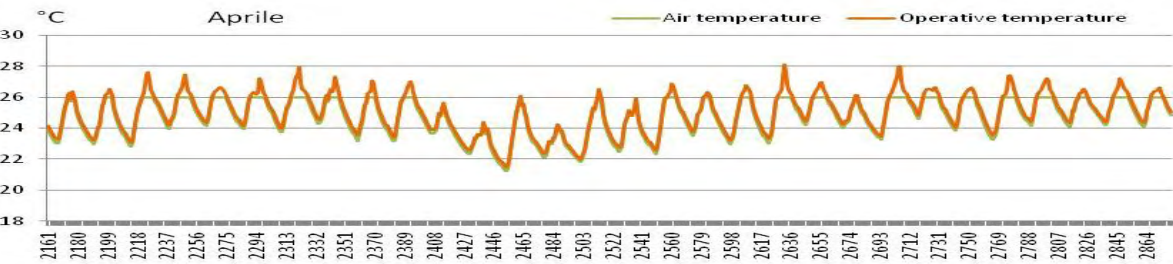
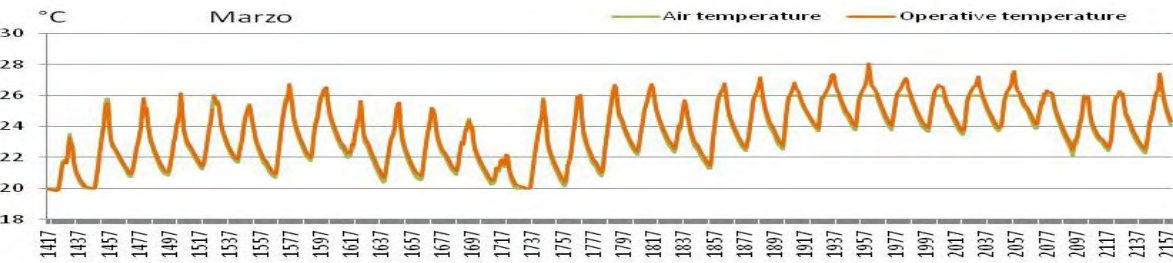
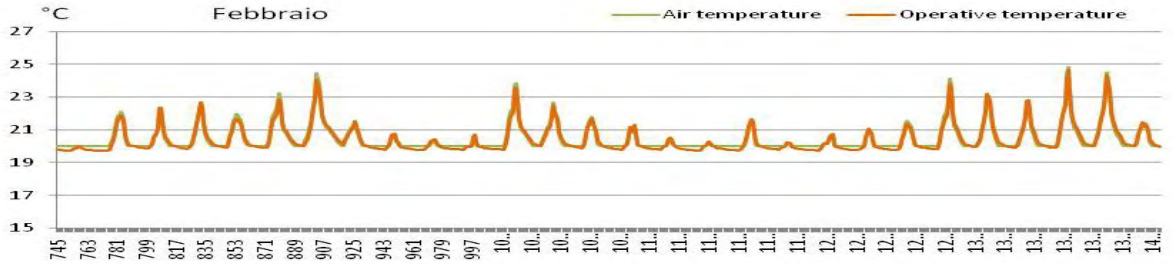
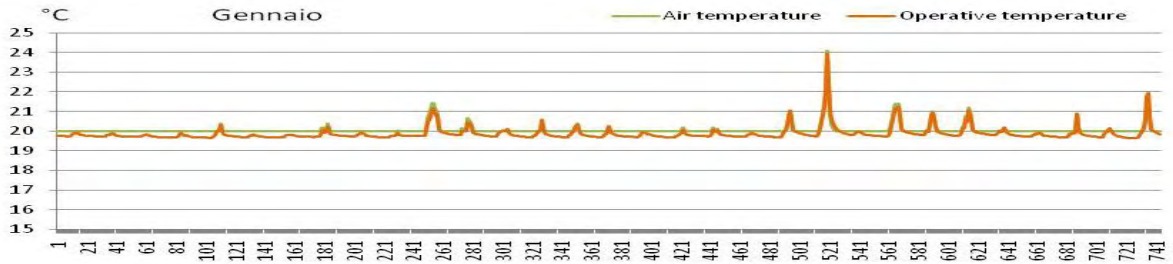


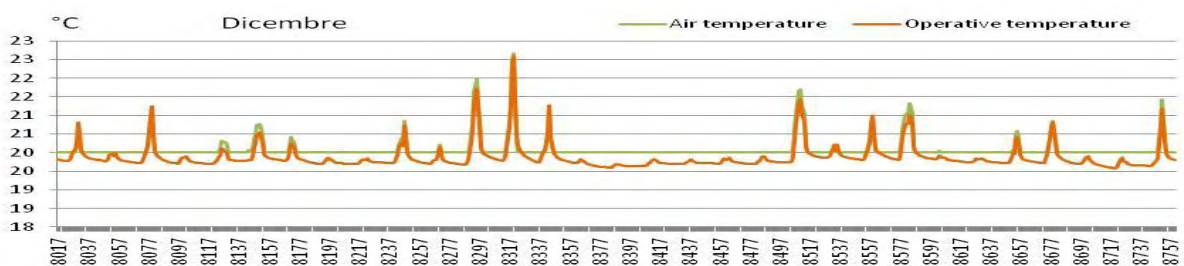
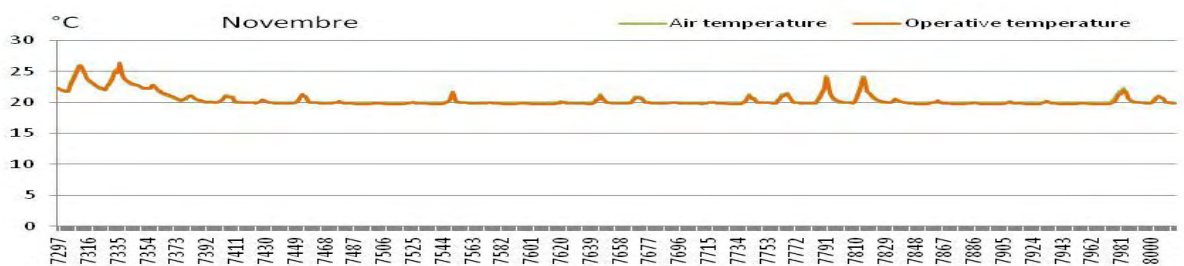
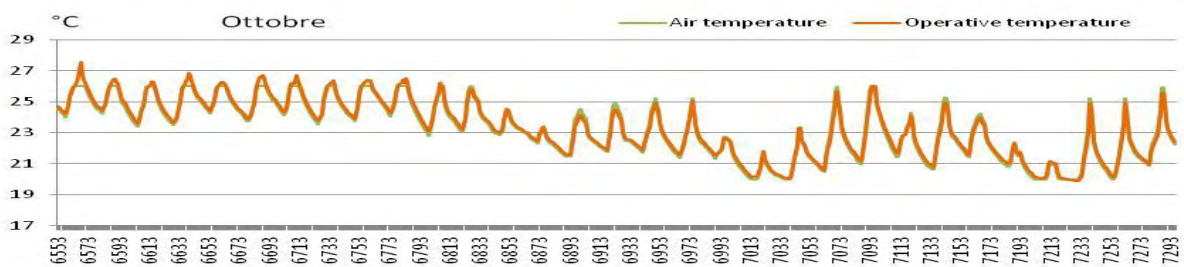
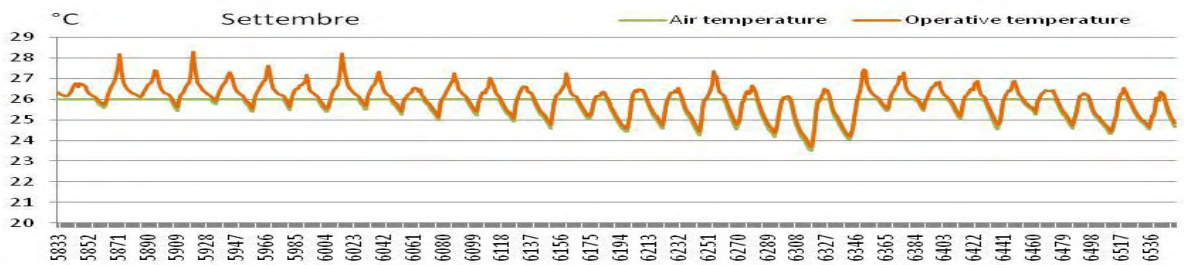
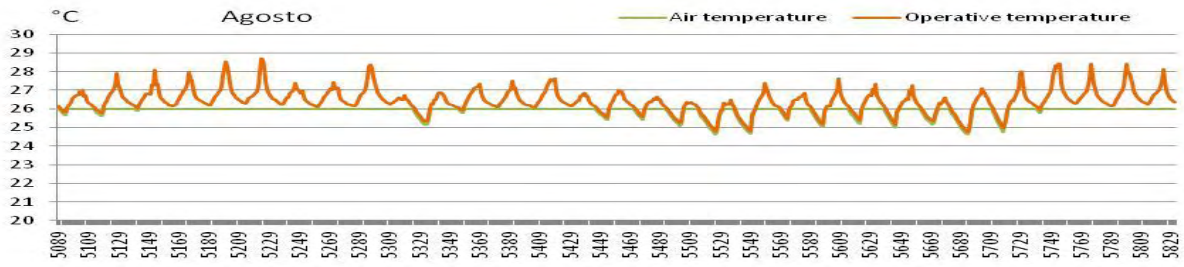
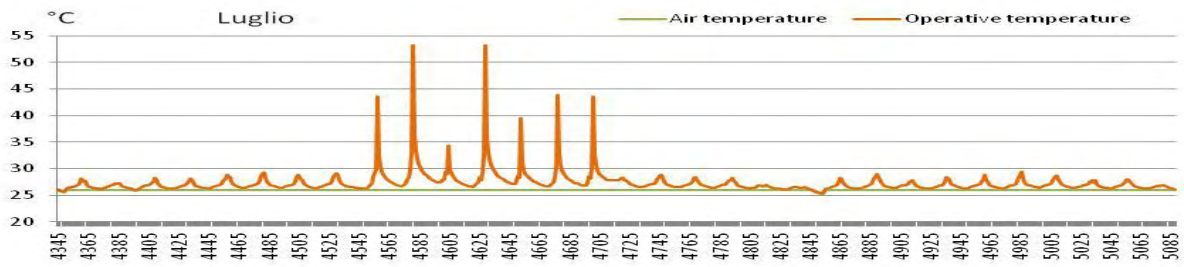
Domanda di climatizzazione Test 3



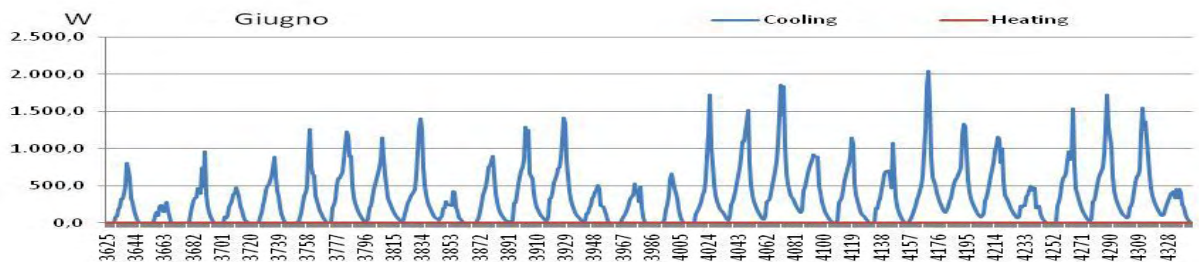
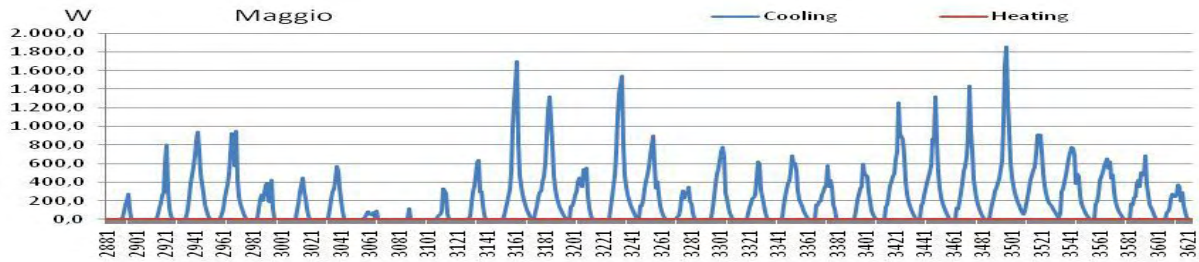
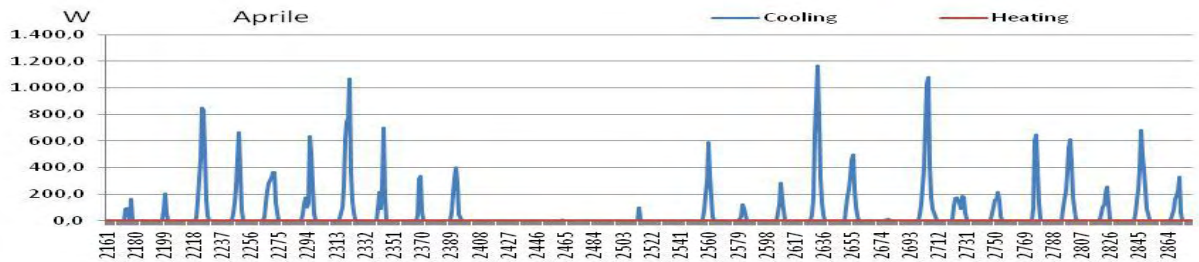
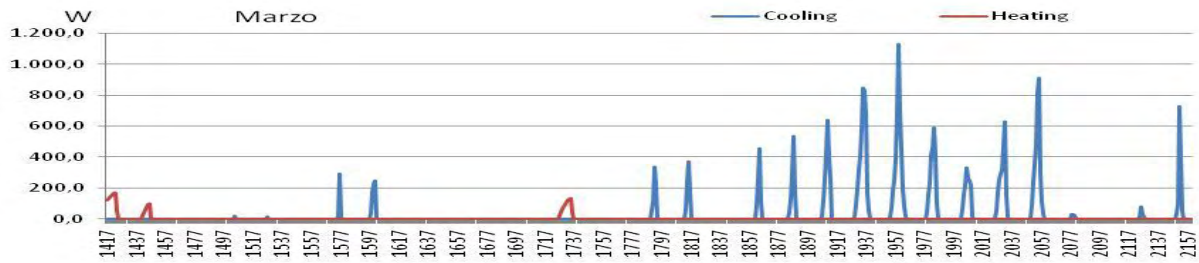
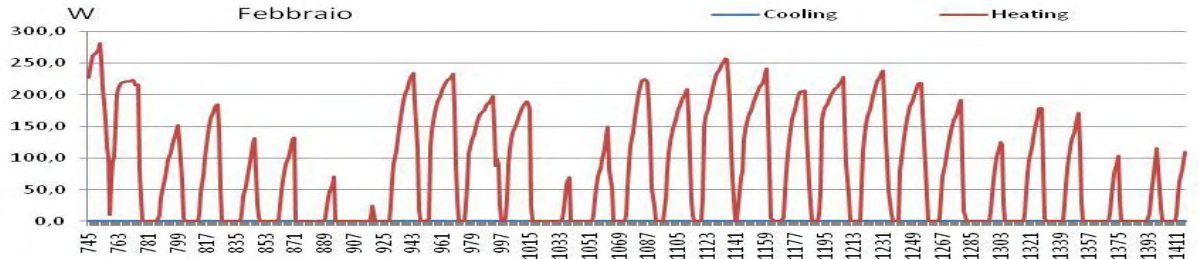
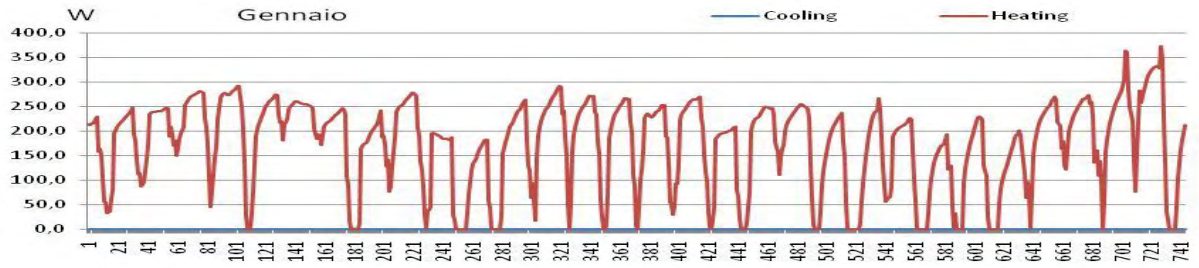


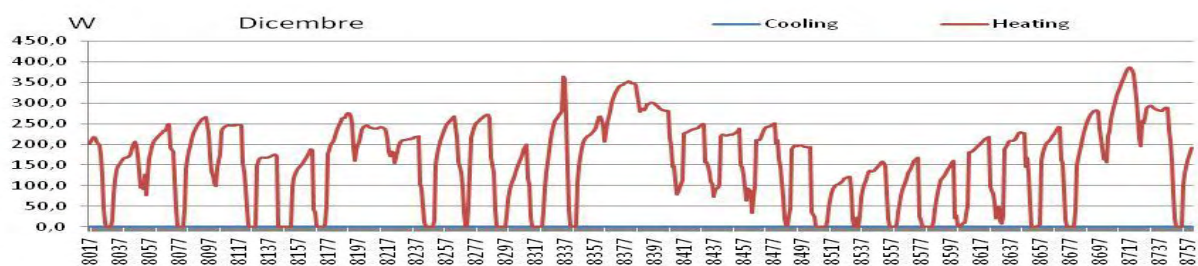
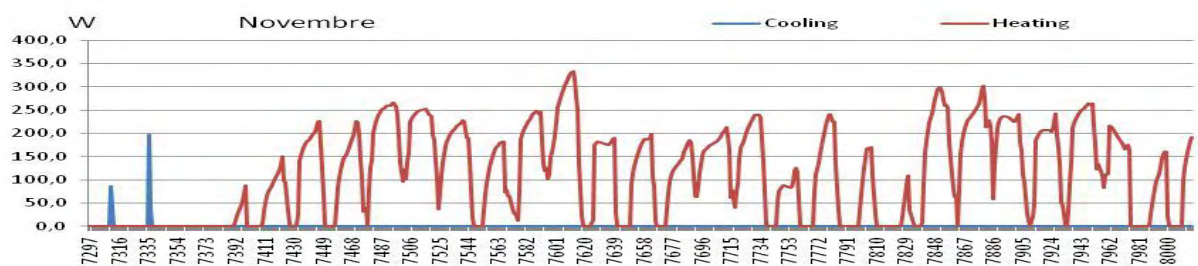
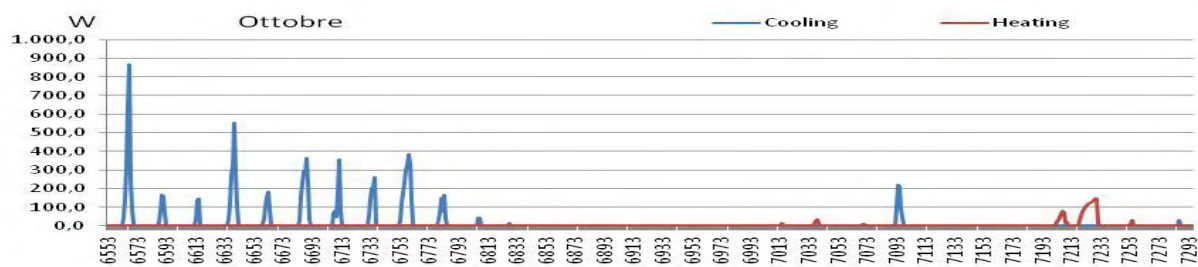
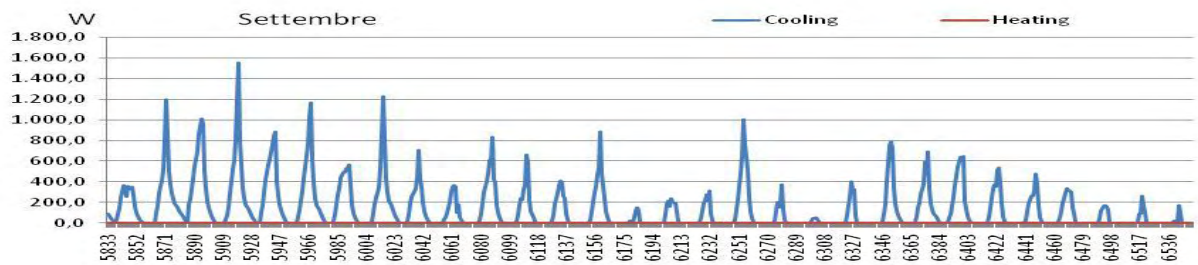
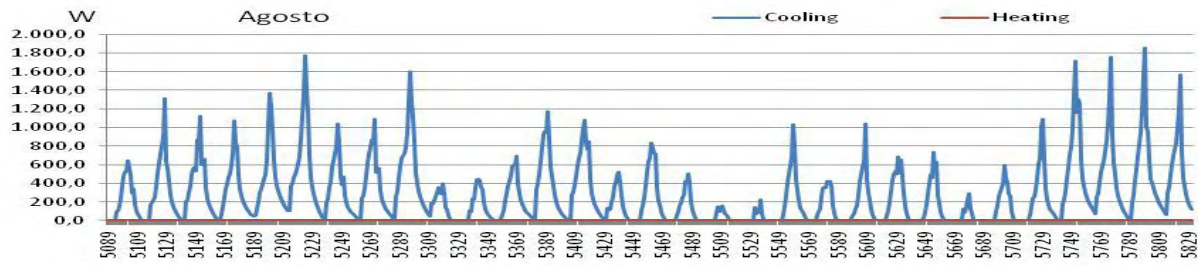
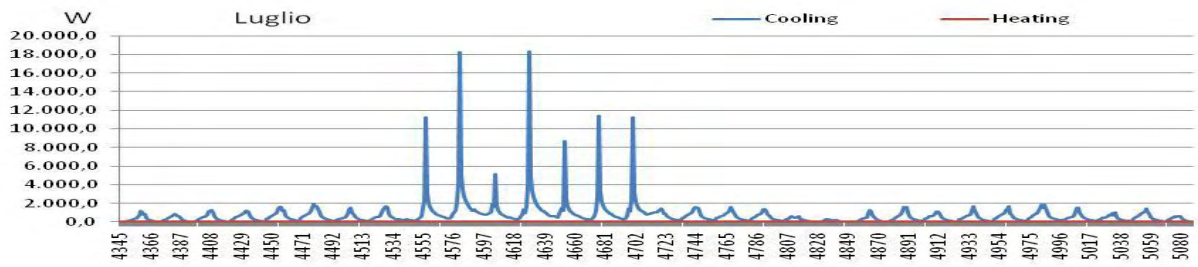
Temperature Test 4



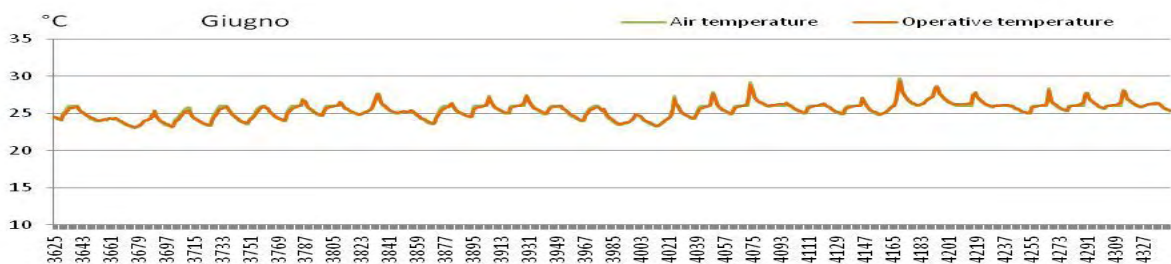
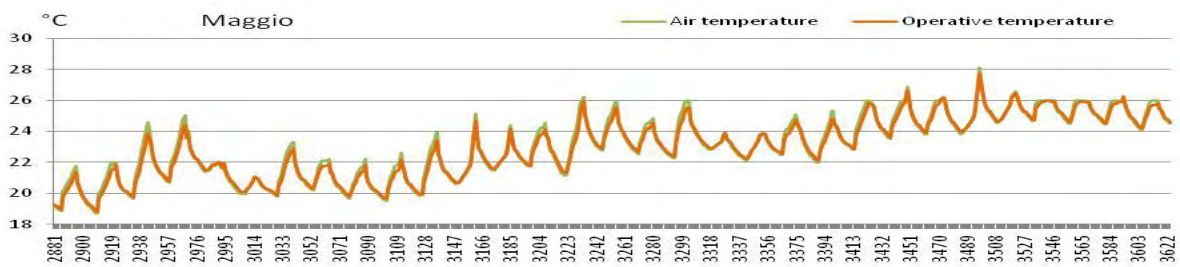
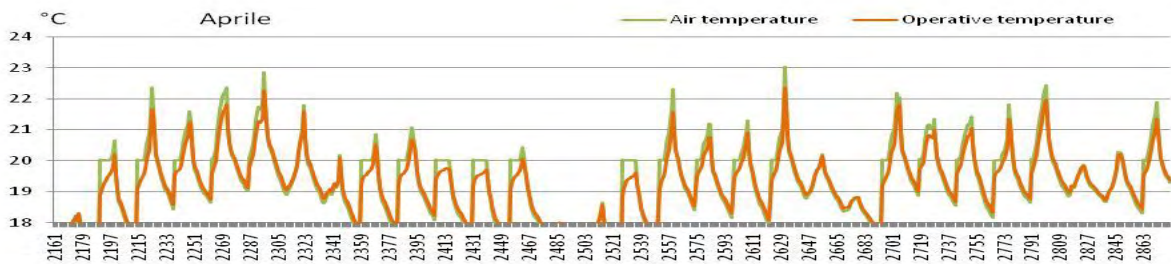
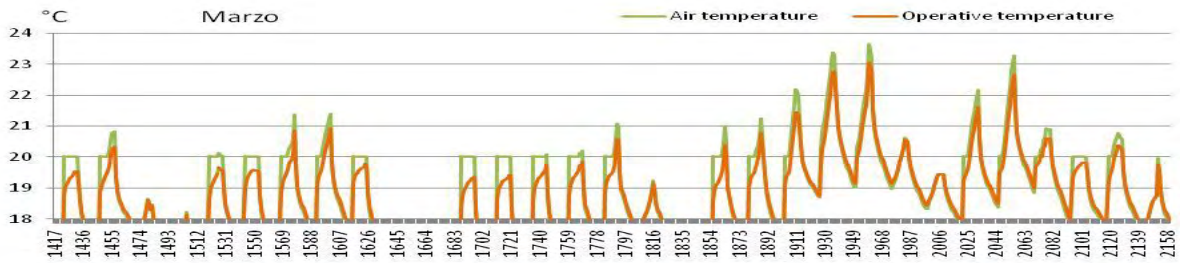
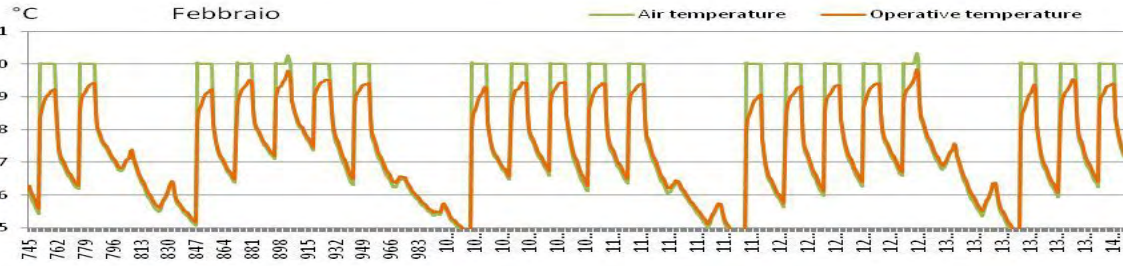
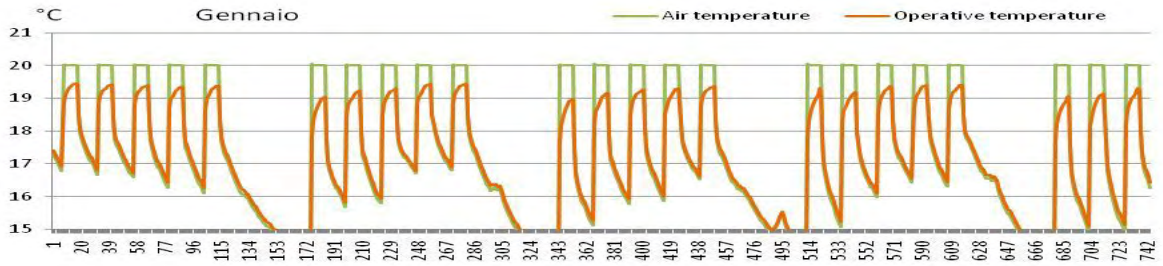


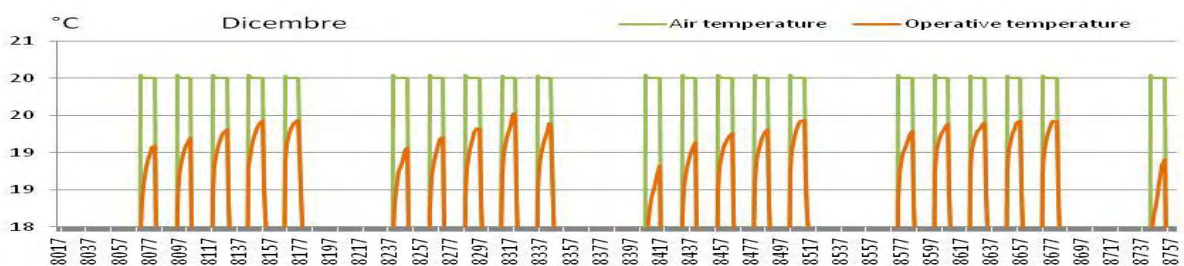
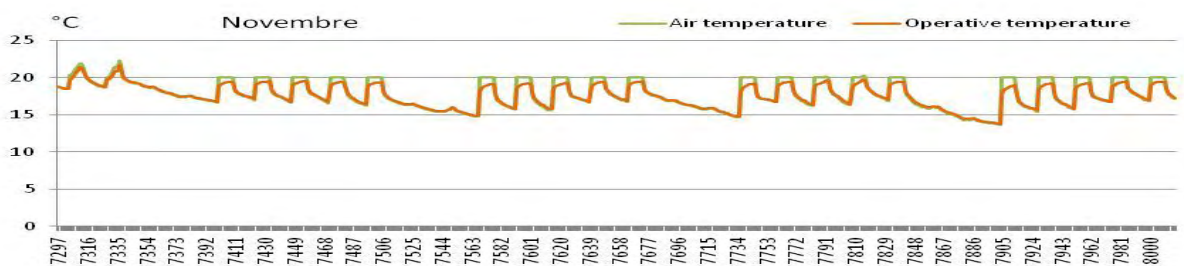
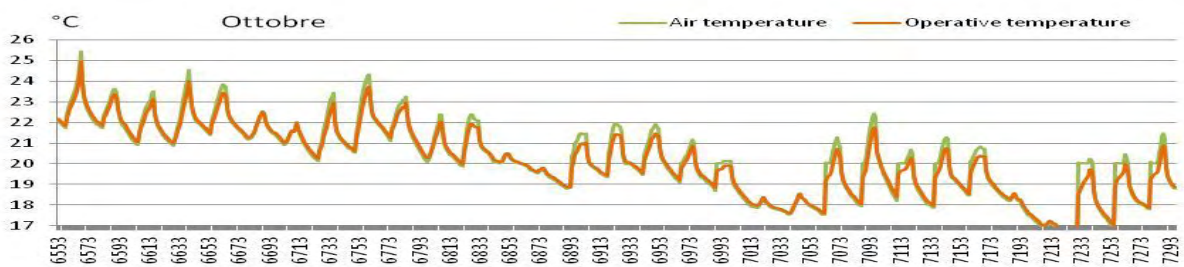
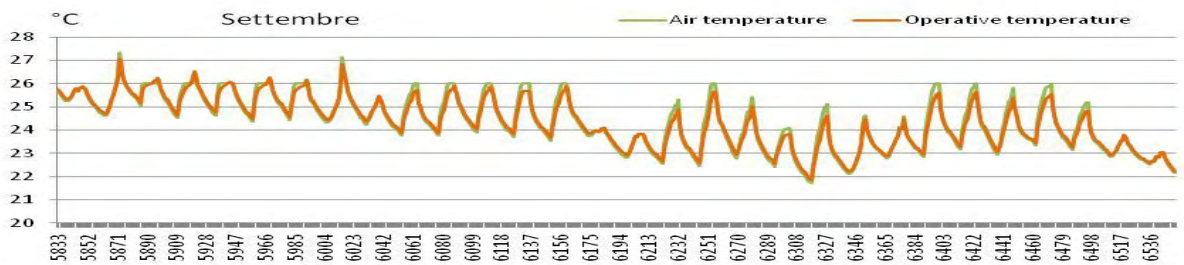
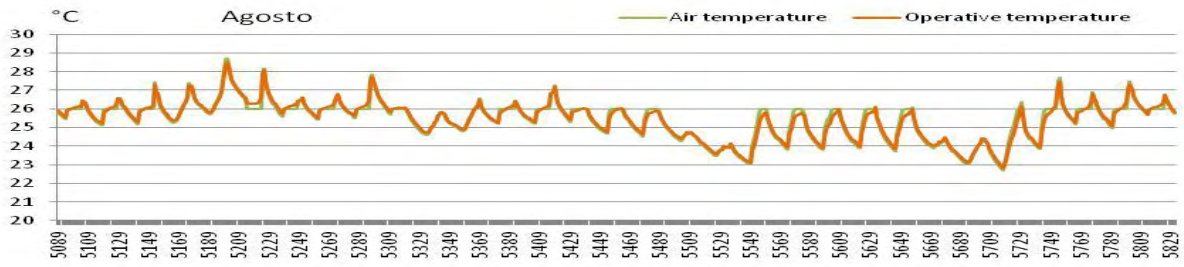
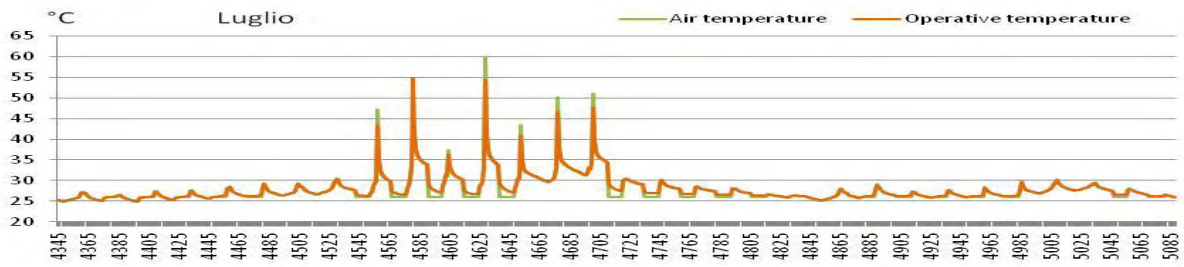
Domanda di climatizzazione Test 4



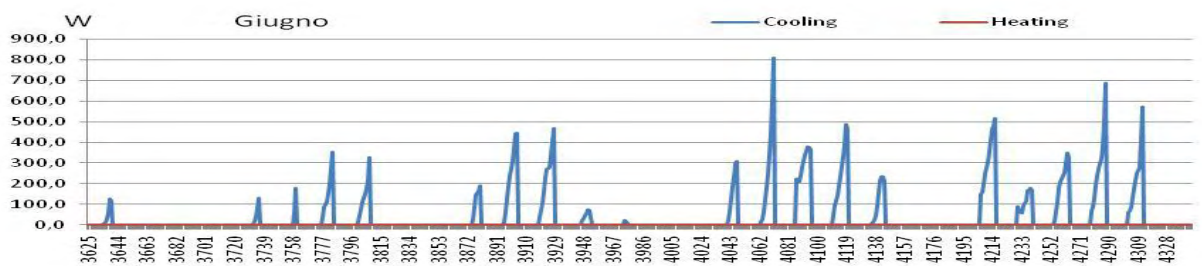
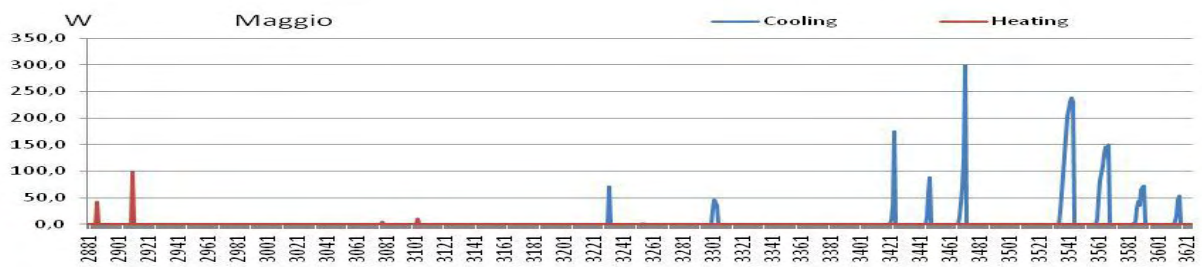
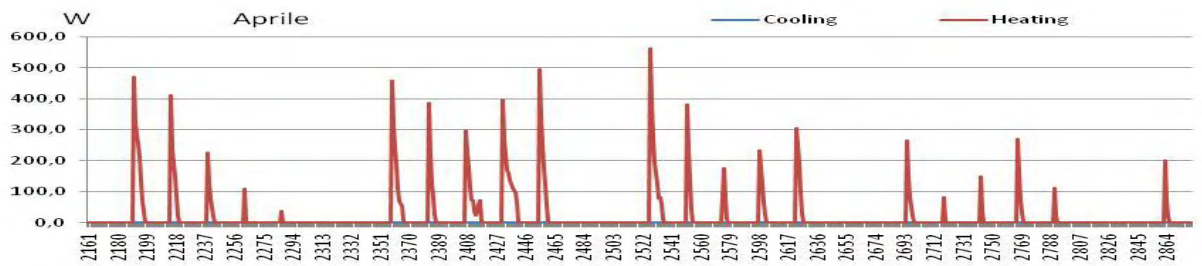
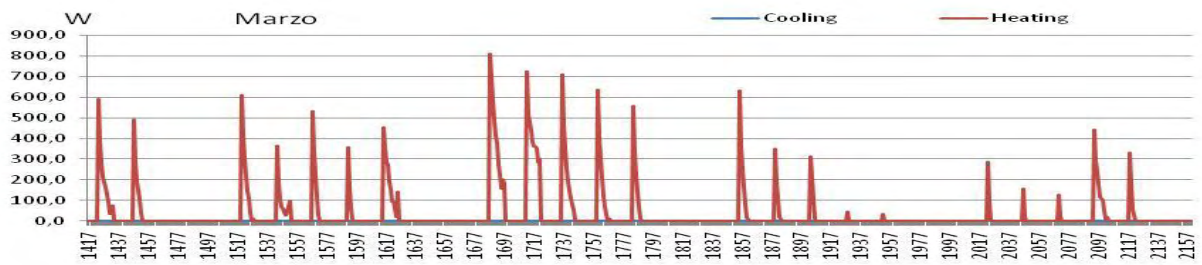
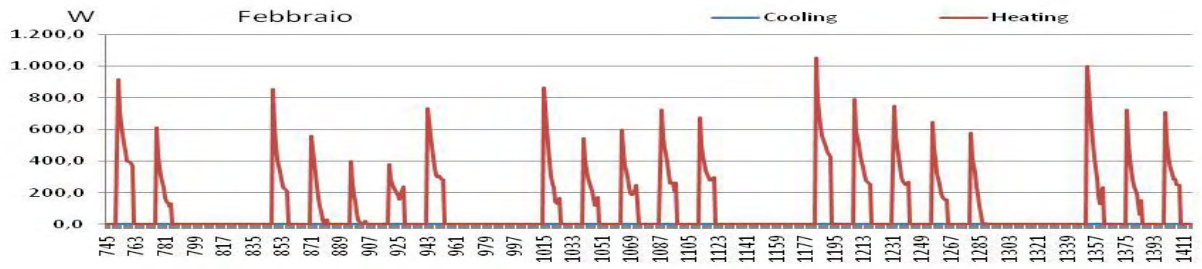
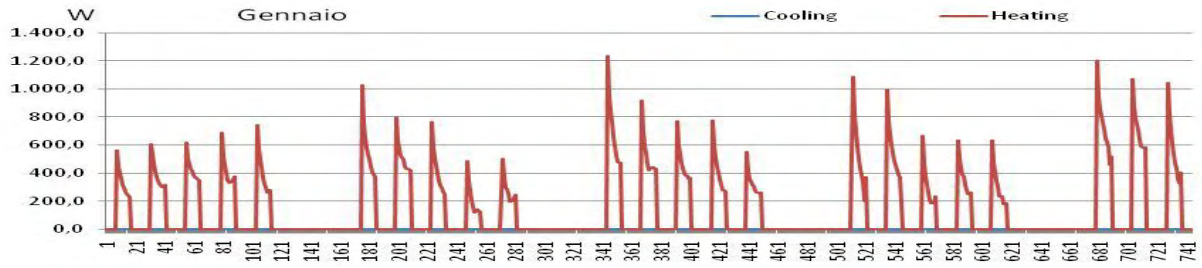


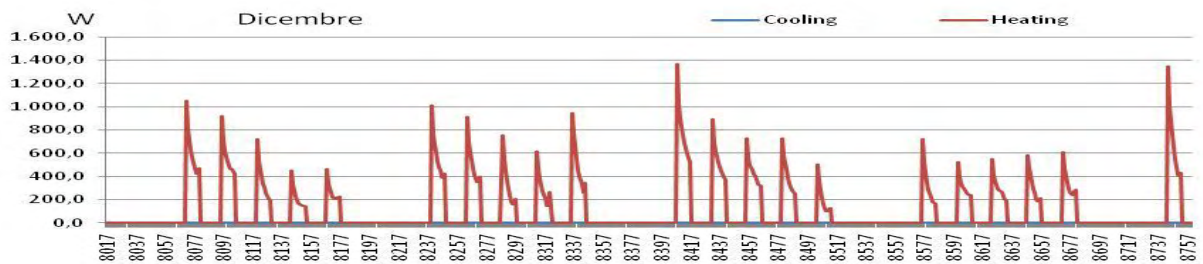
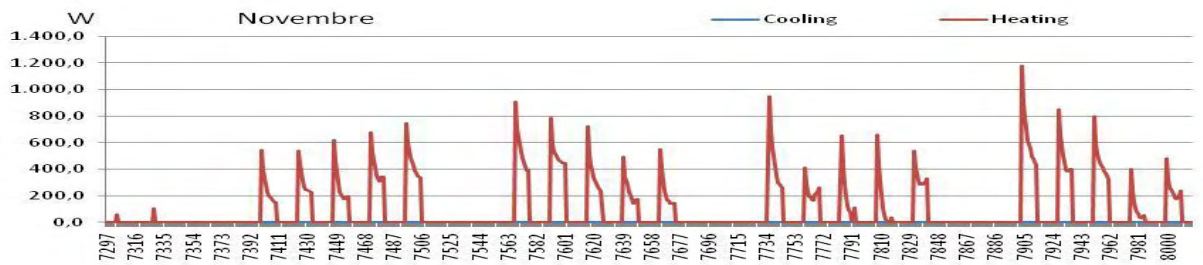
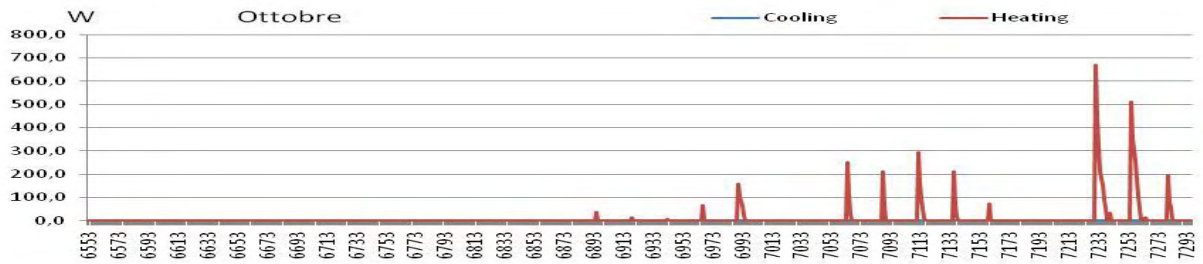
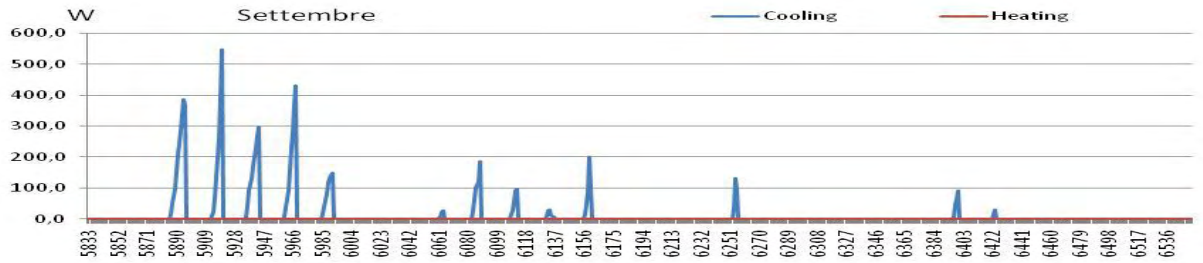
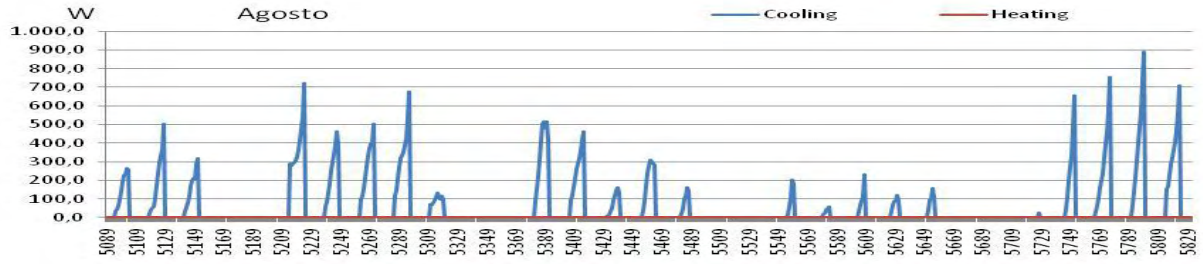
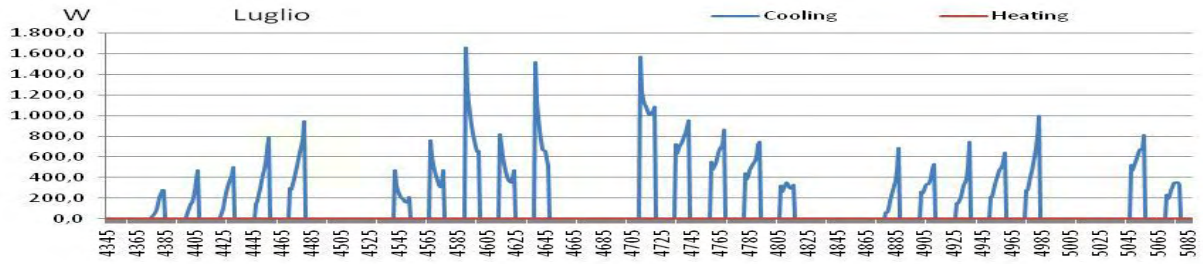
Temperature Test 5



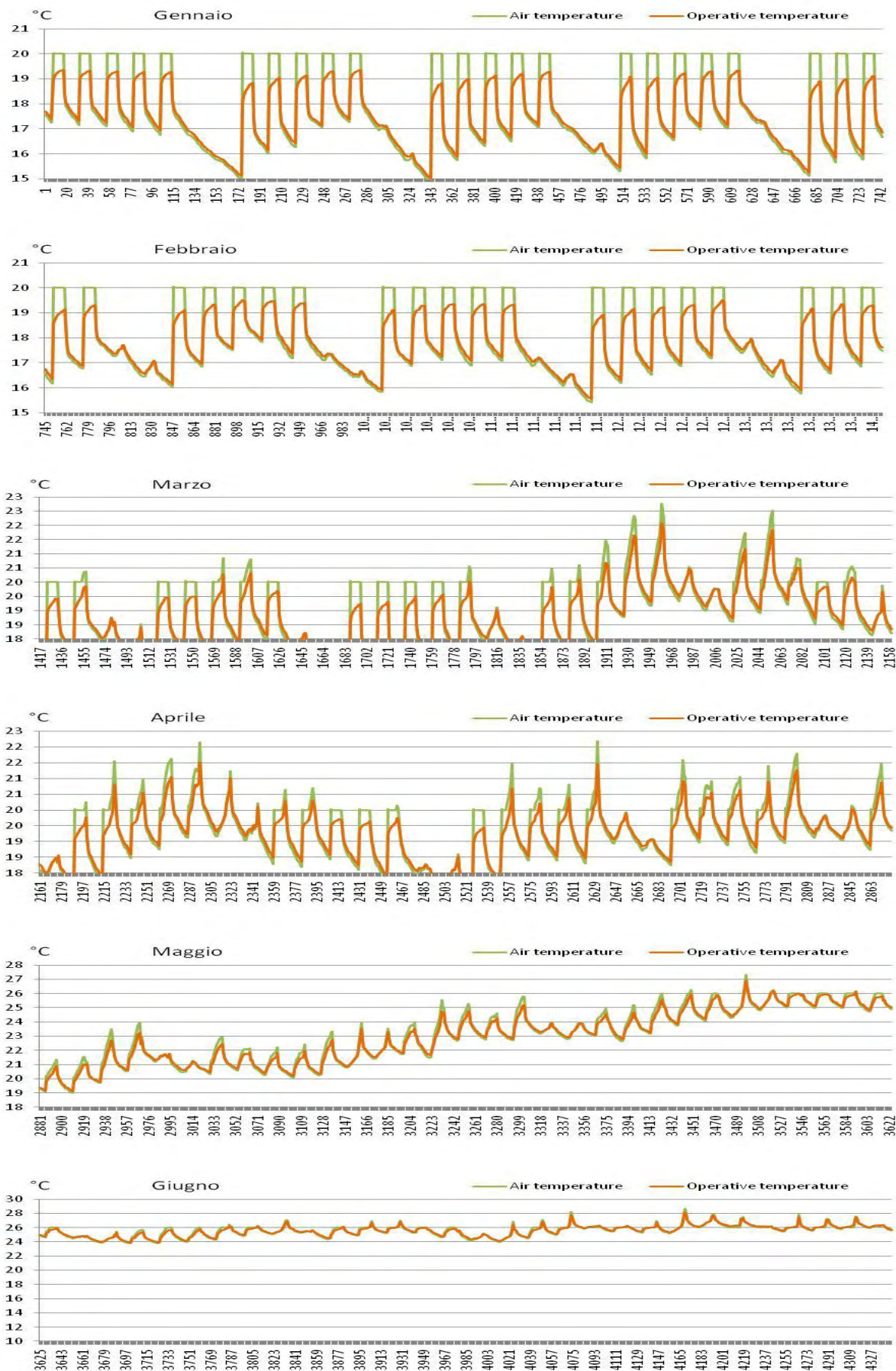


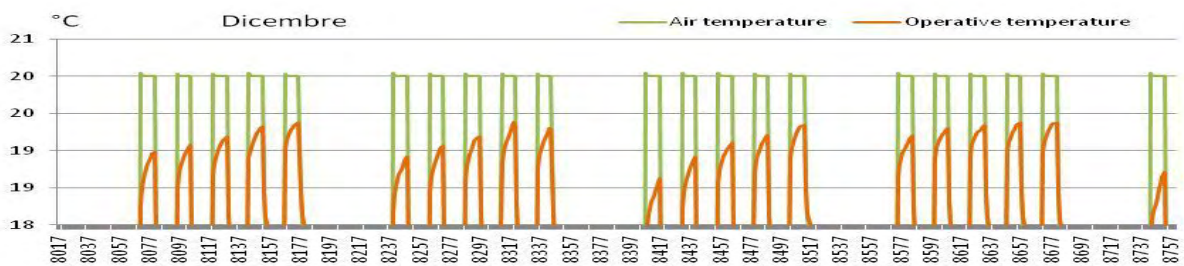
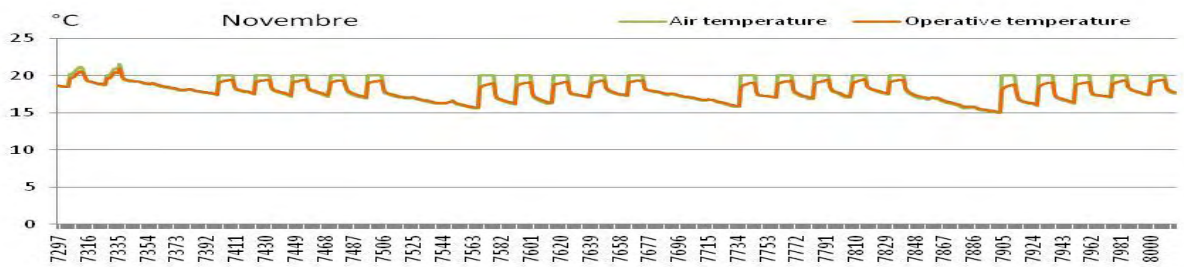
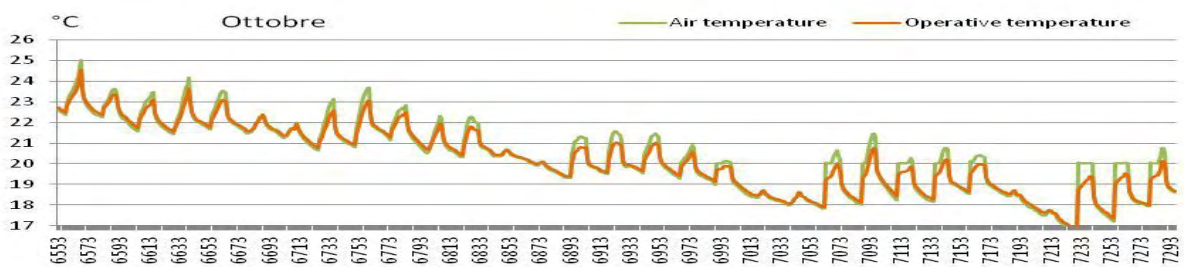
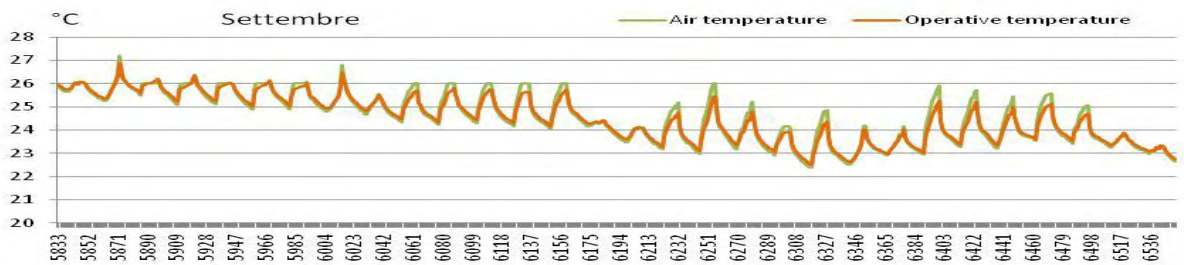
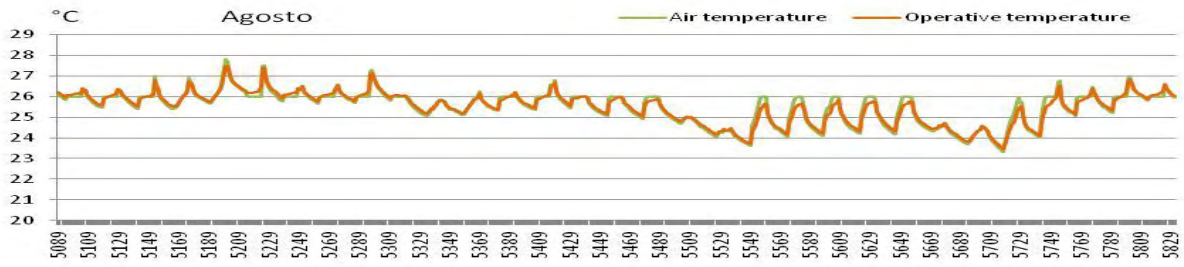
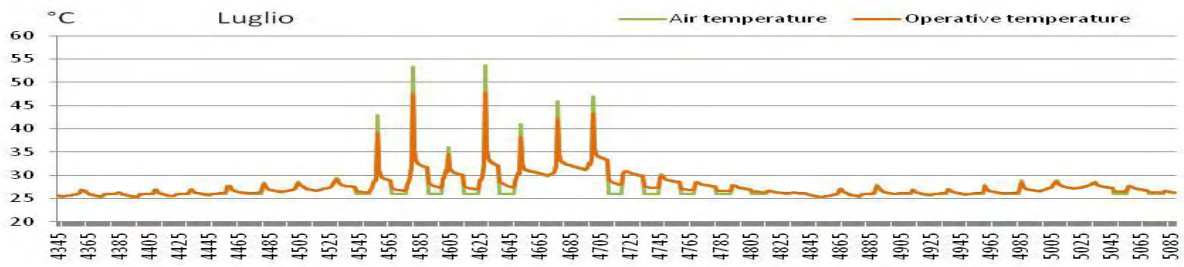
Domanda di climatizzazione Test 5



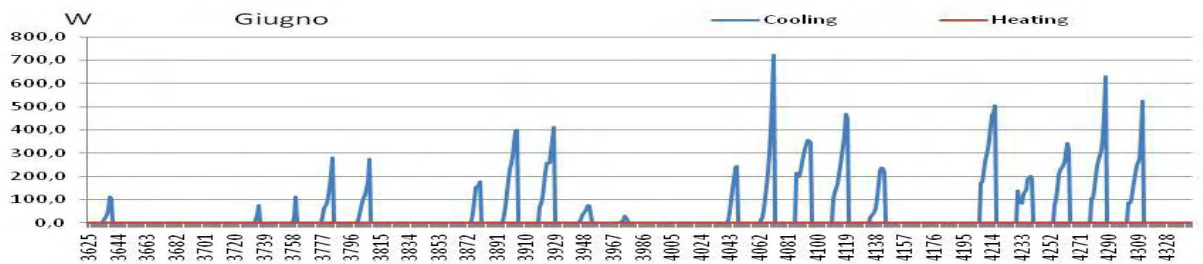
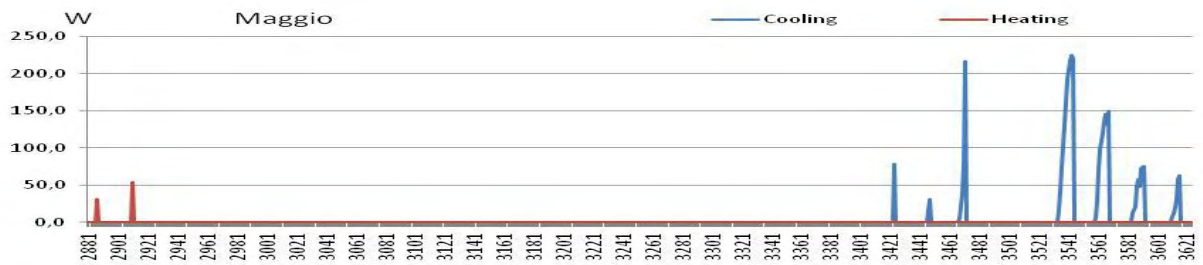
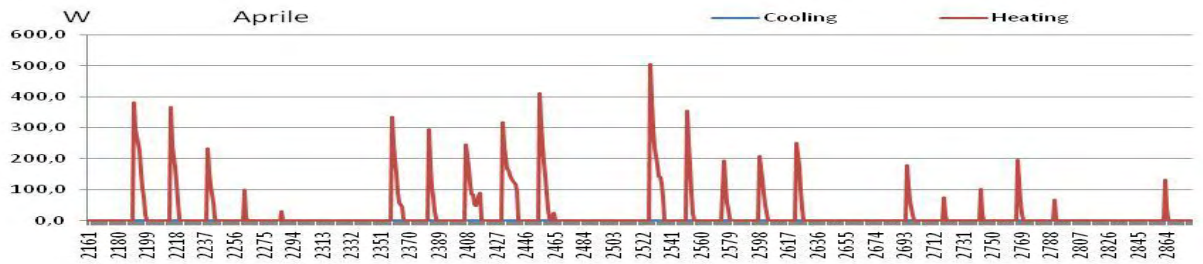
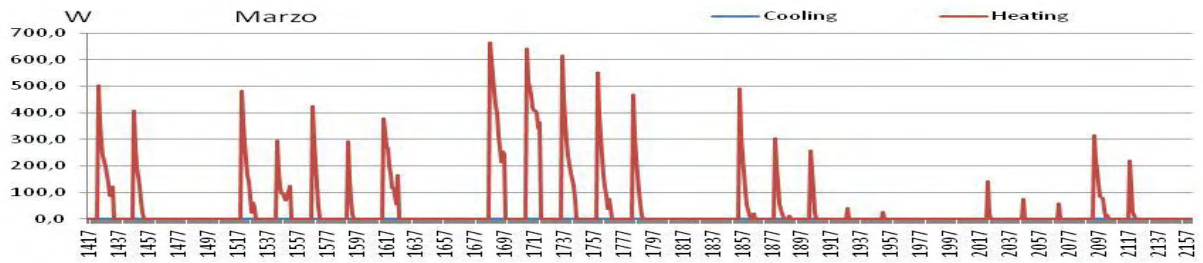
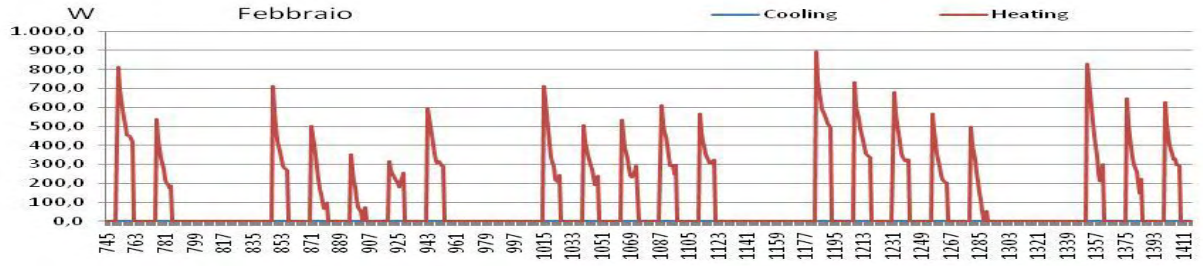
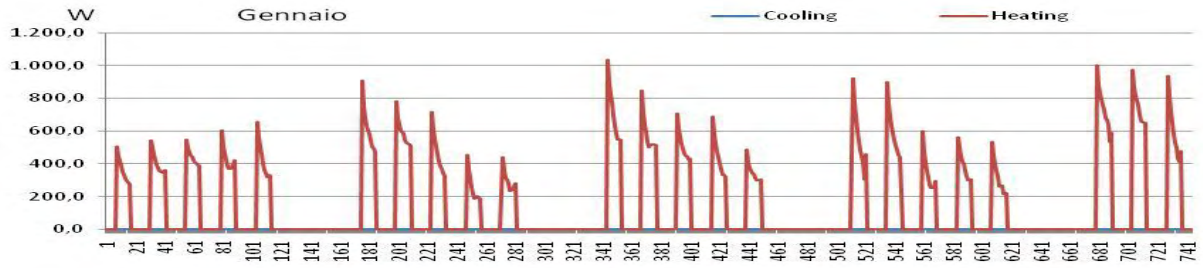


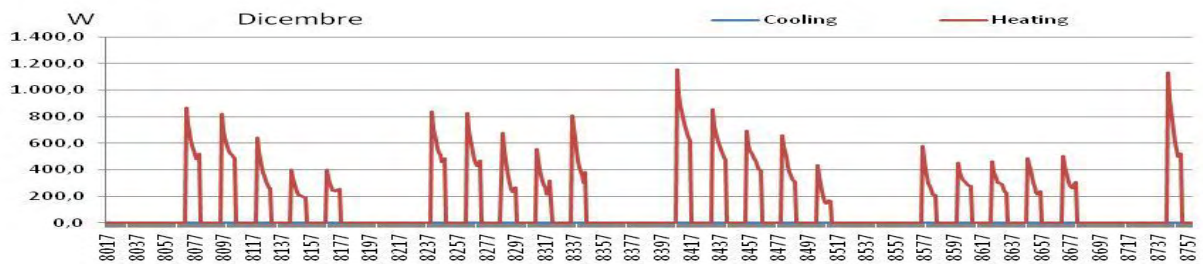
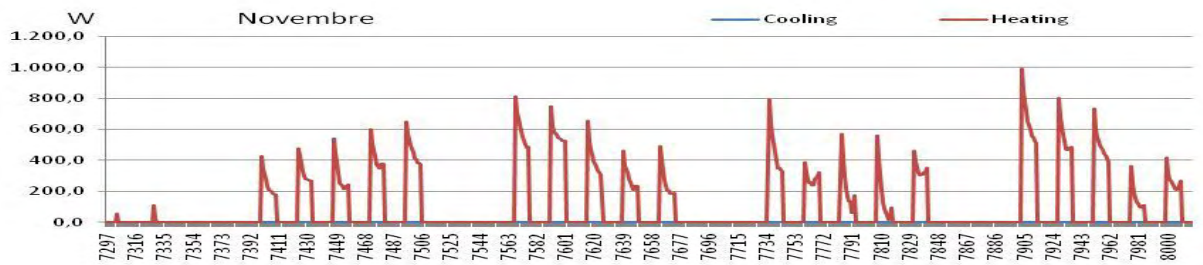
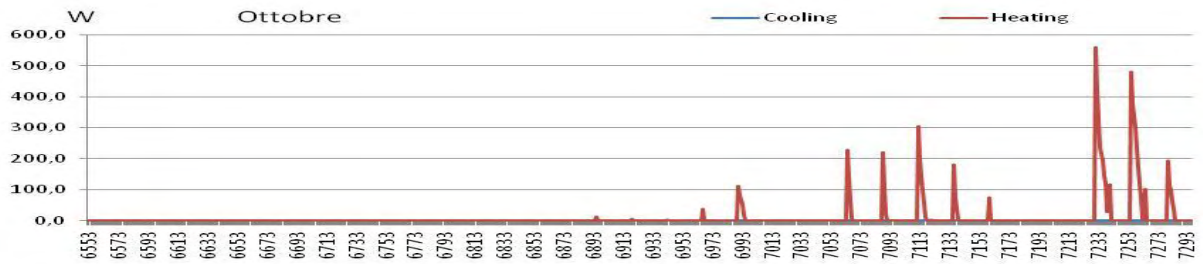
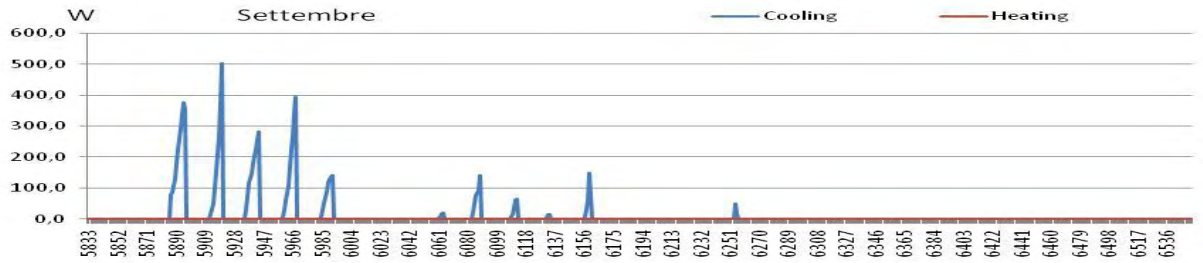
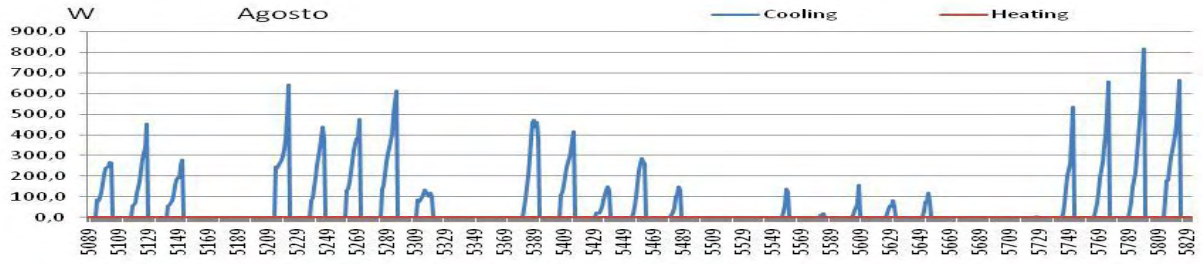
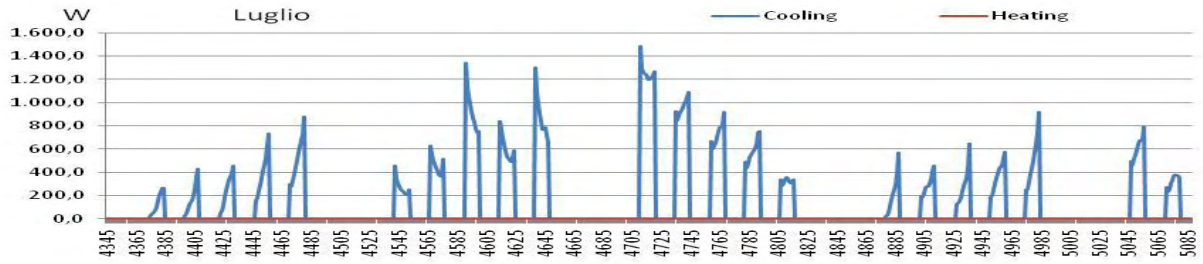
Temperature Test 6



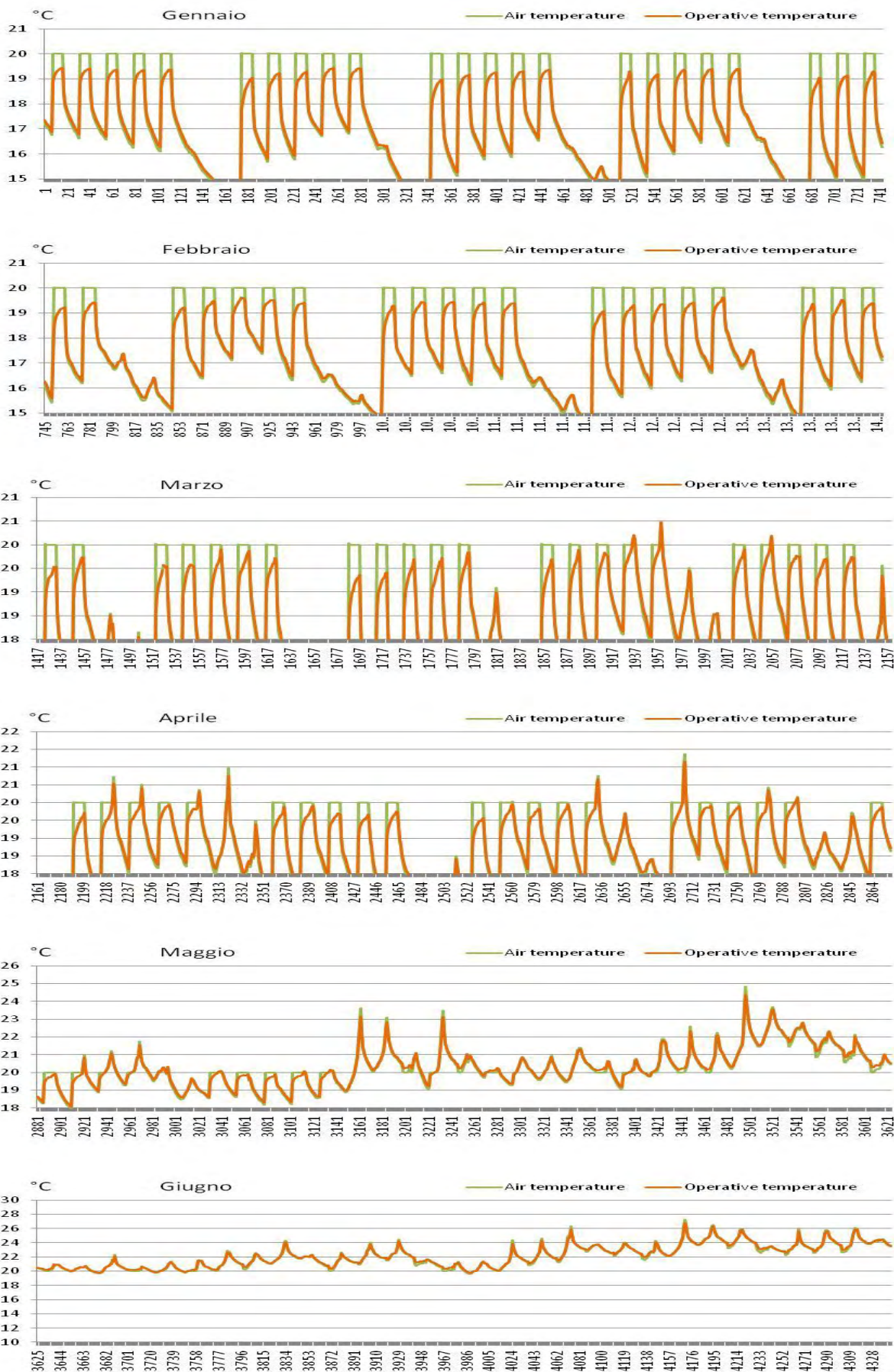


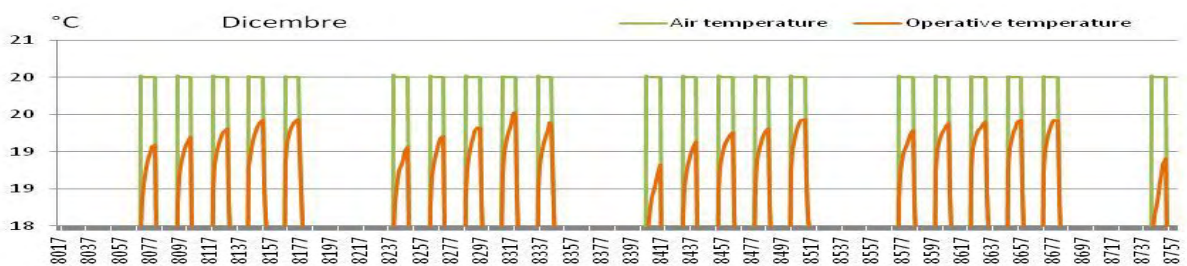
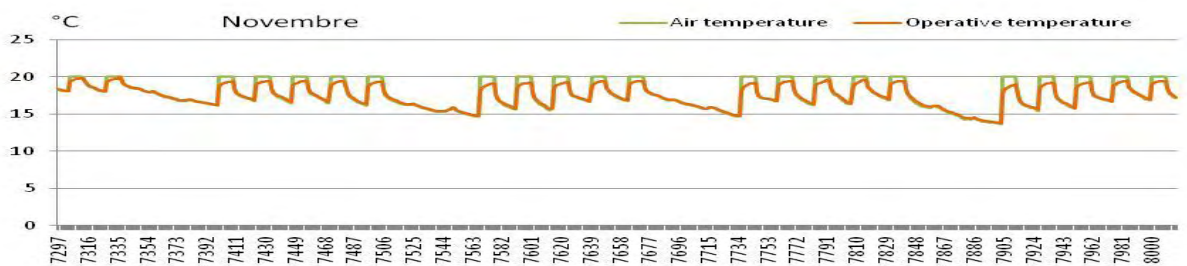
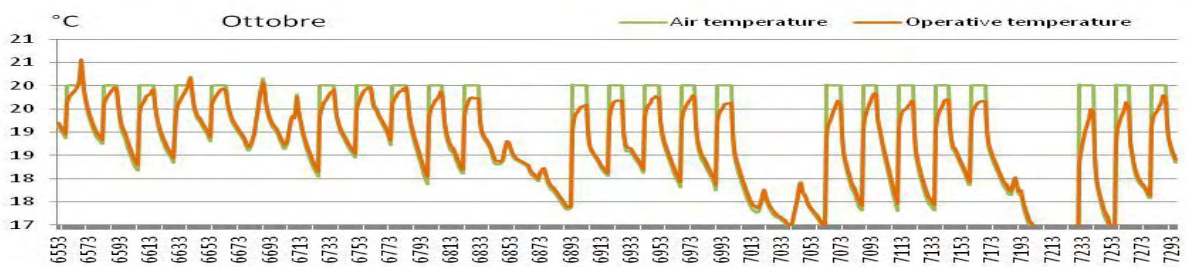
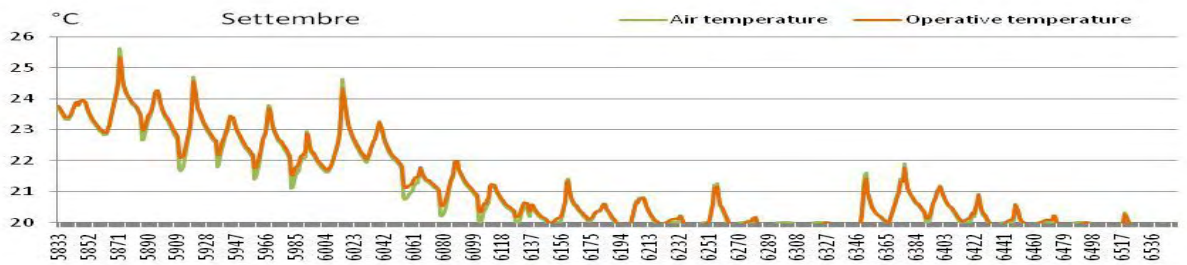
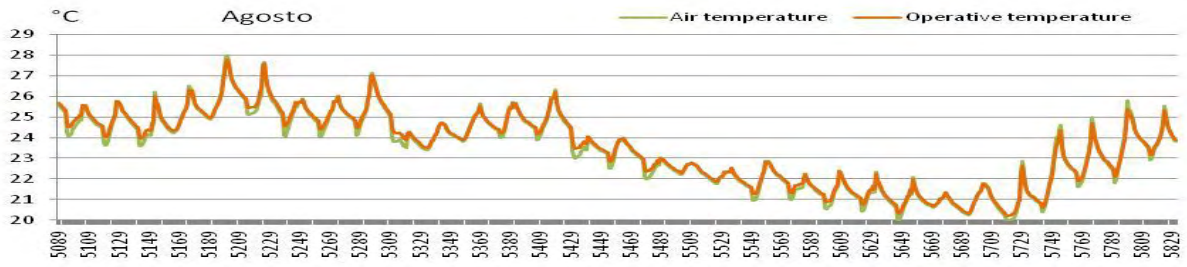
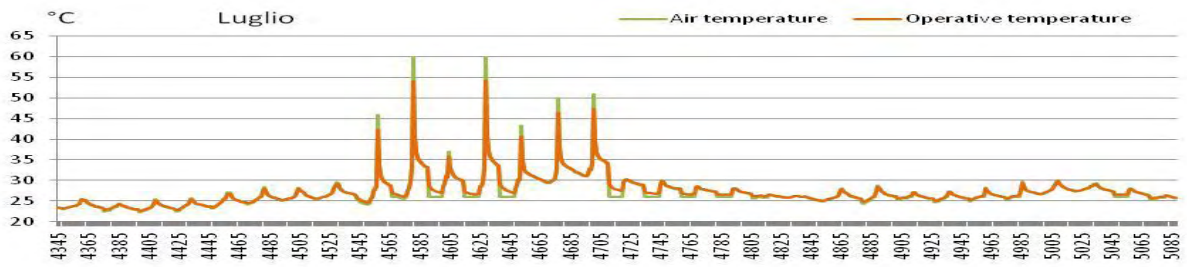
Domanda di climatizzazione Test 6



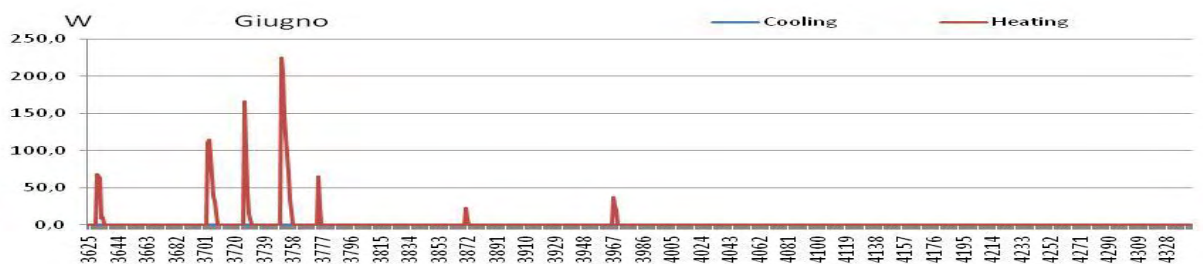
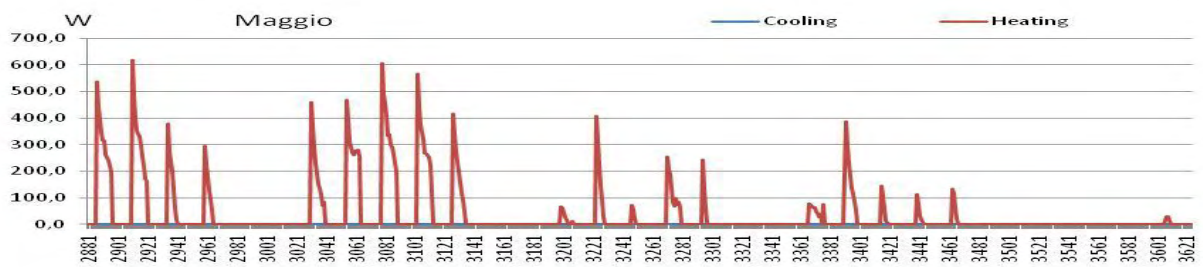
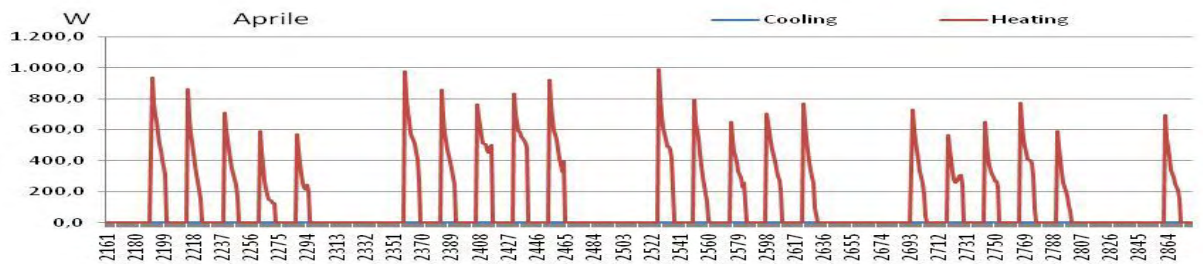
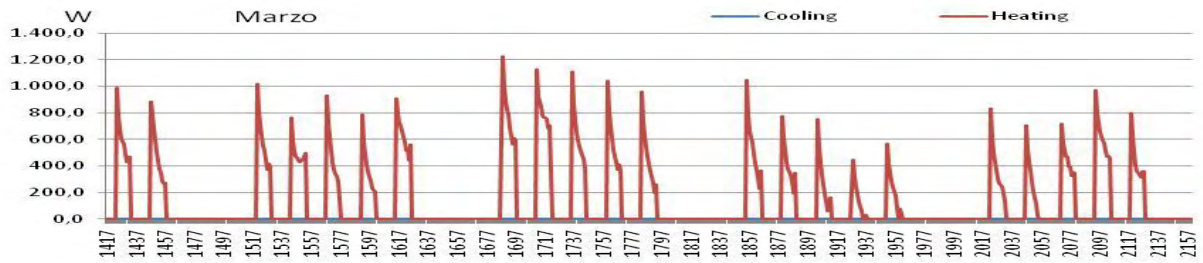
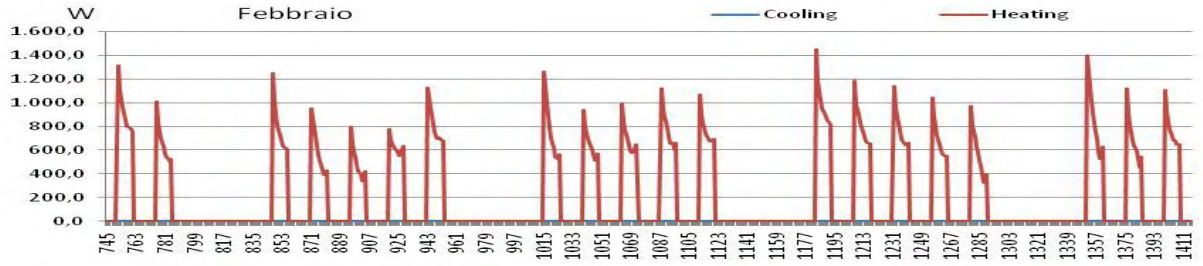
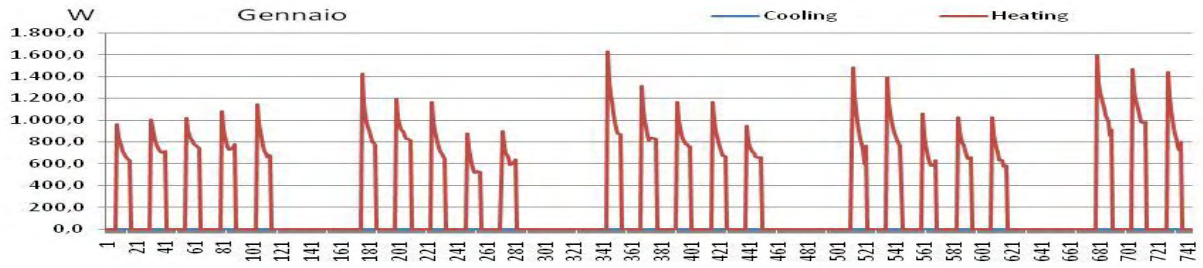


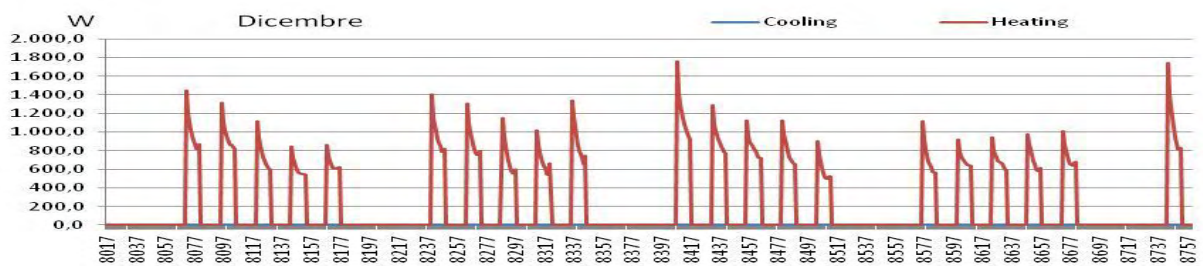
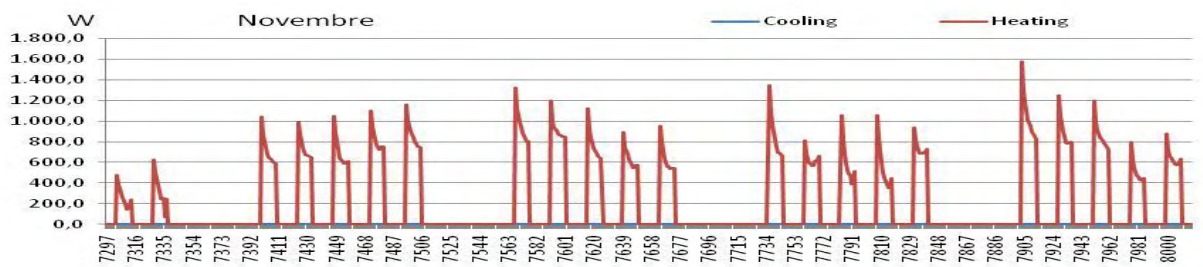
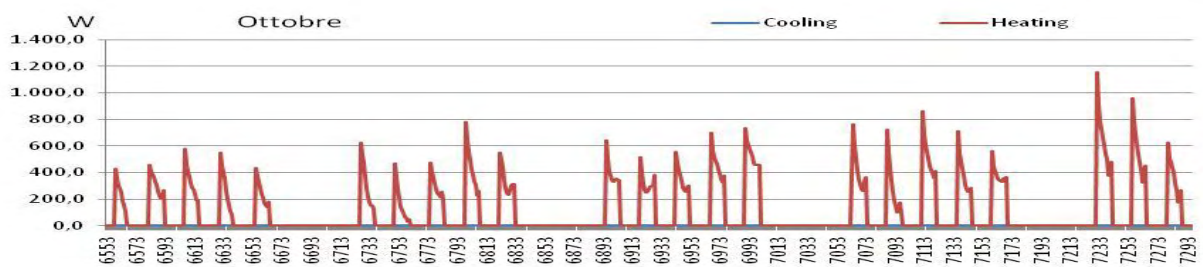
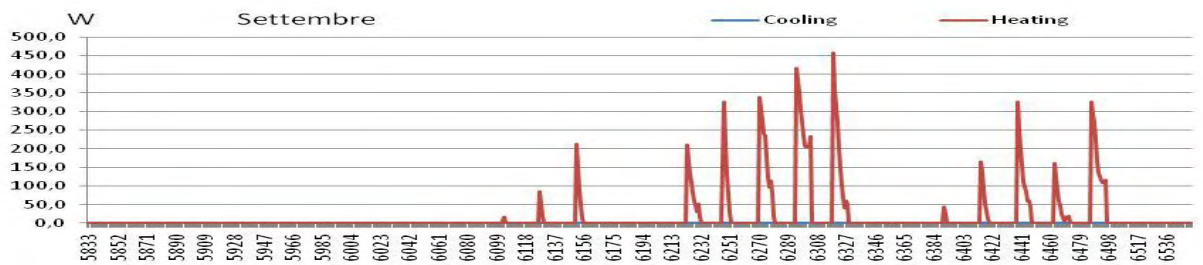
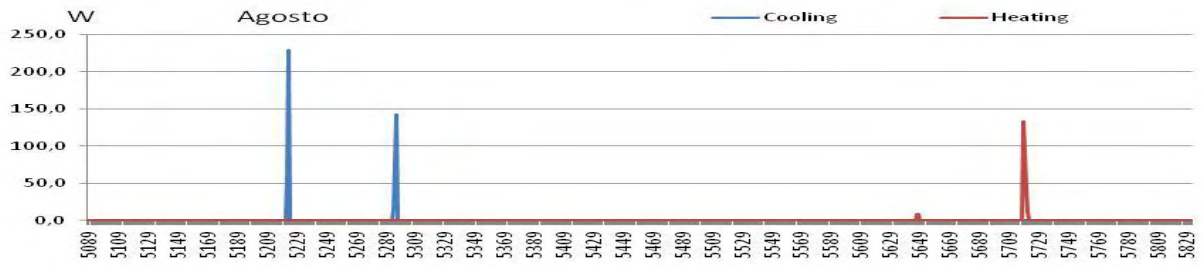
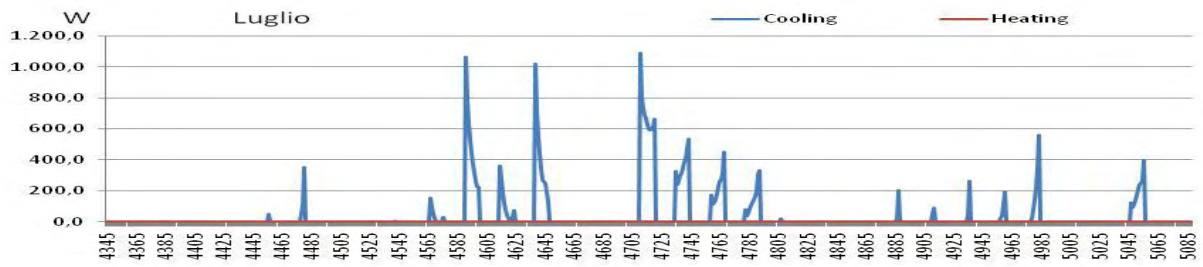
Temperature Test 7



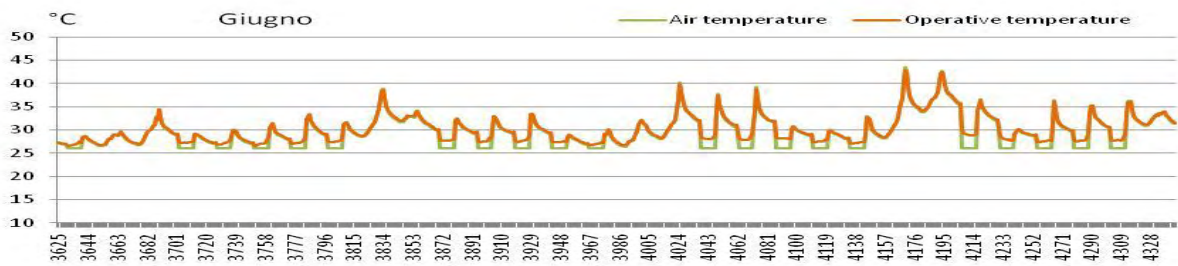
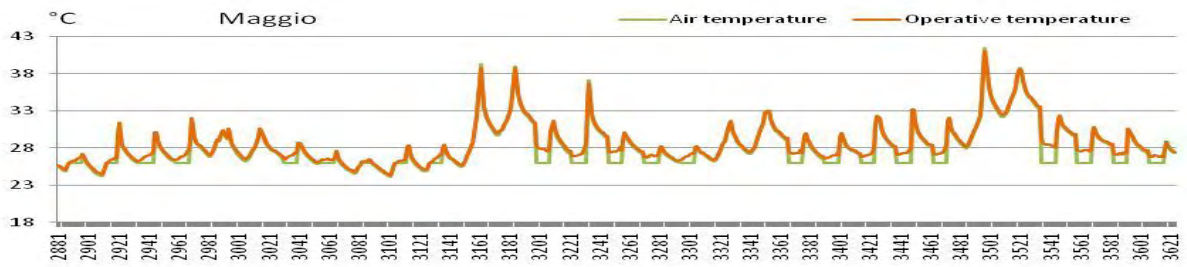
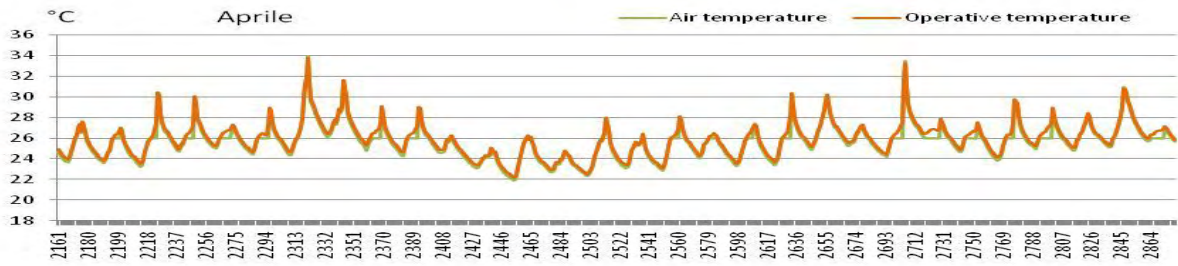
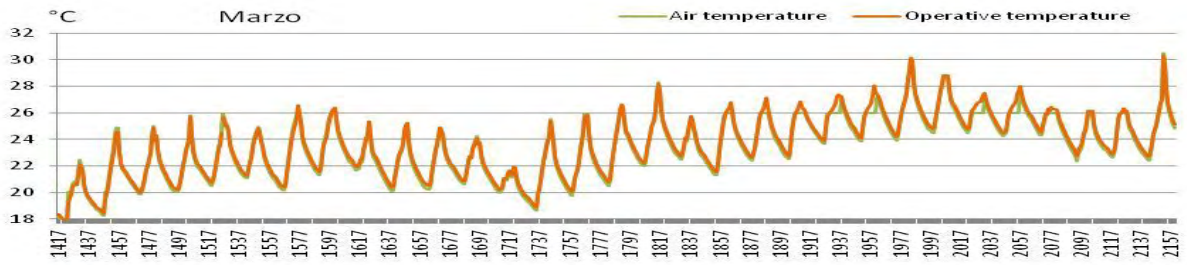
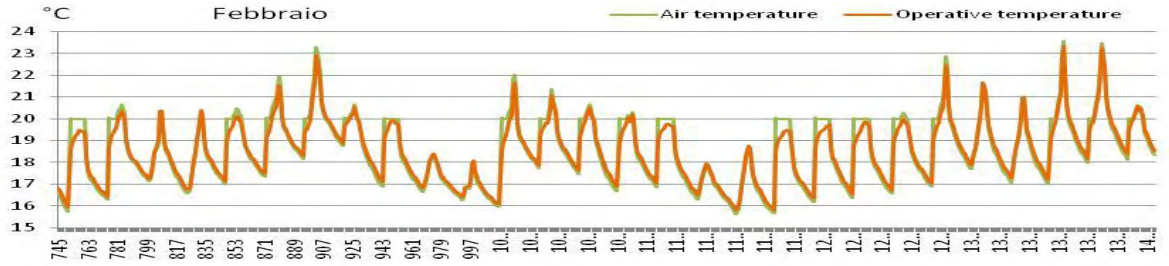
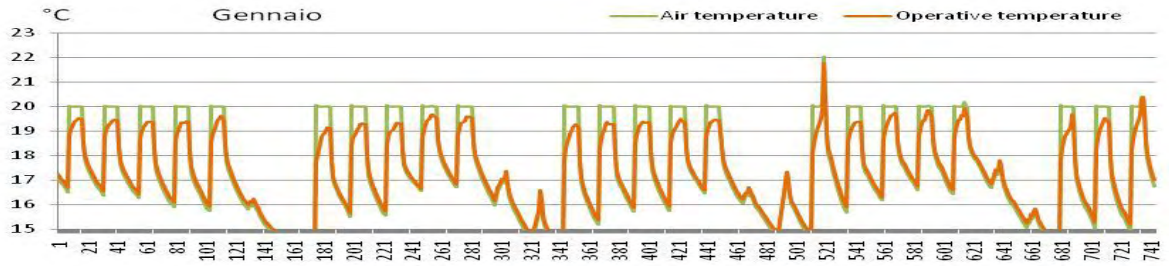


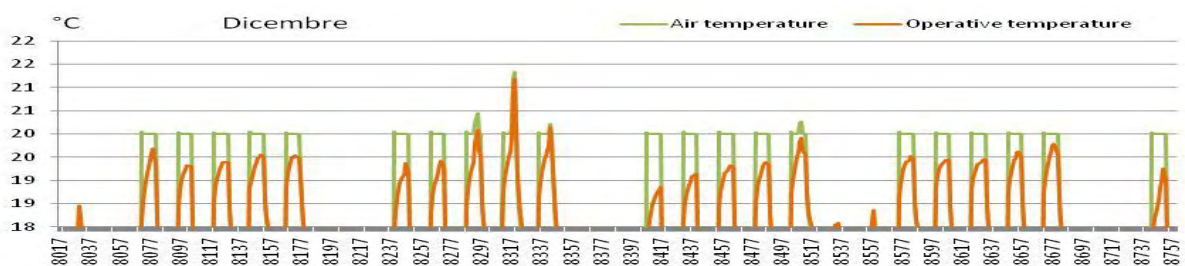
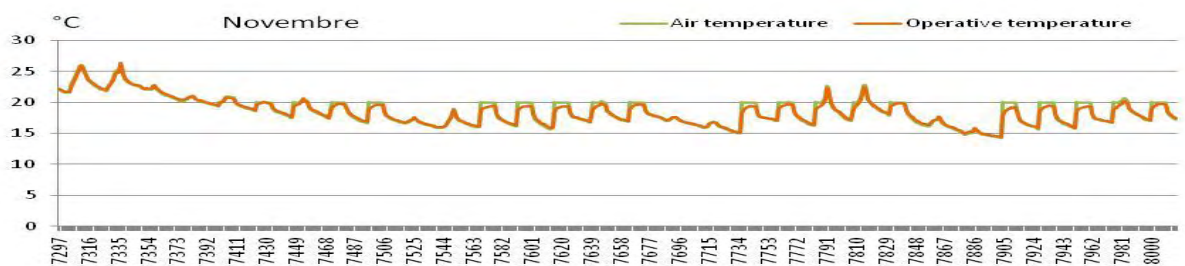
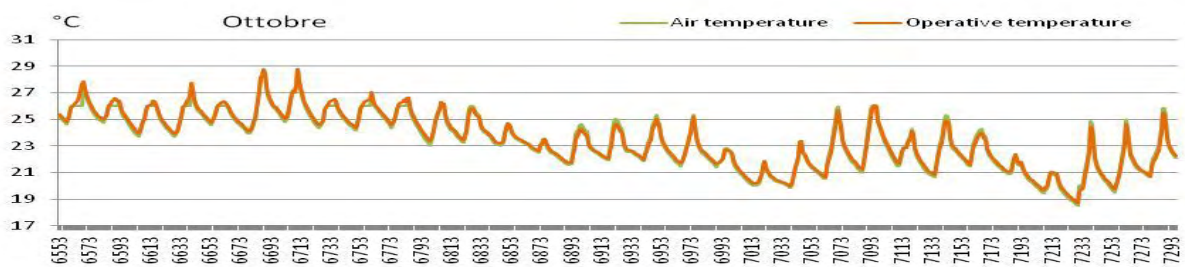
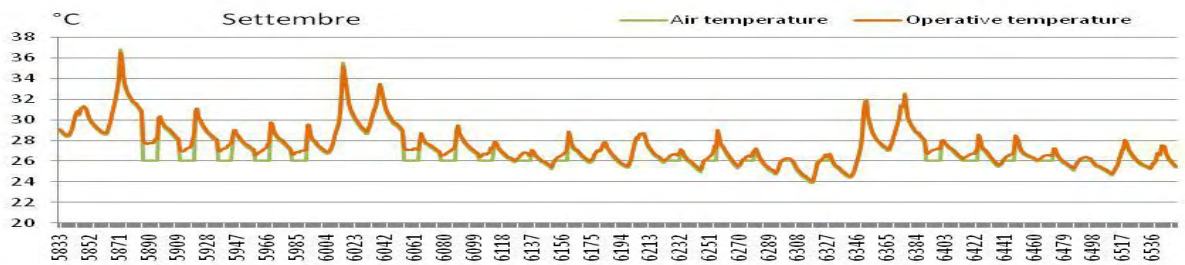
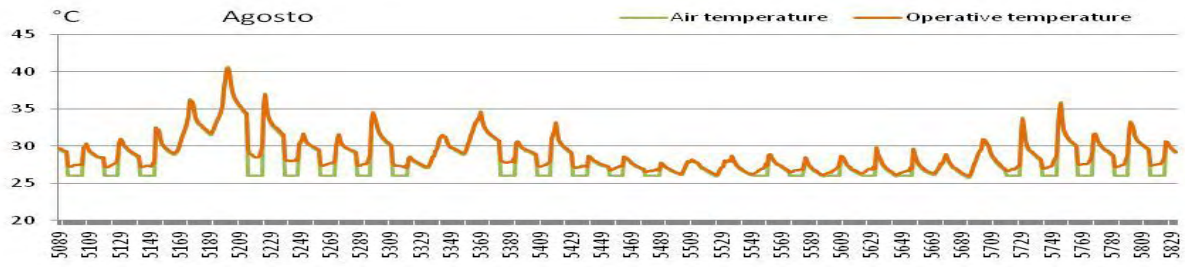
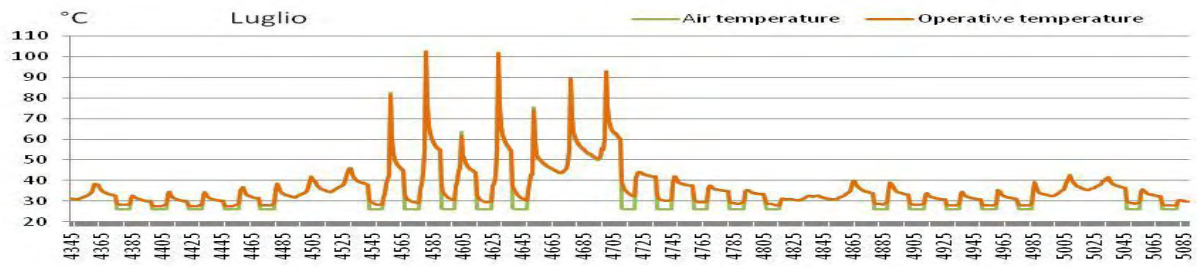
Domanda di climatizzazione Test 7



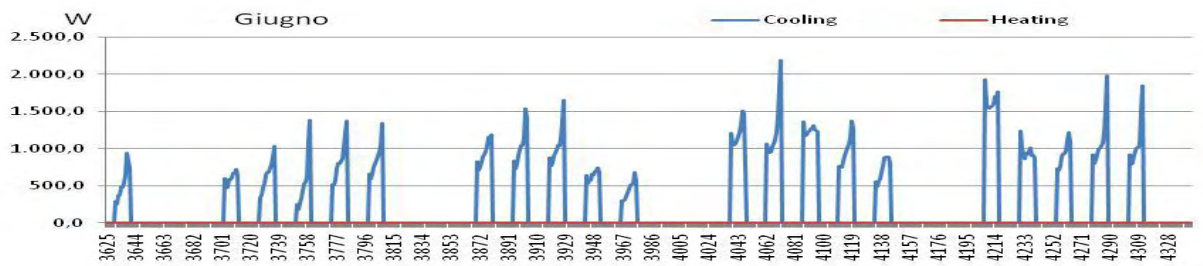
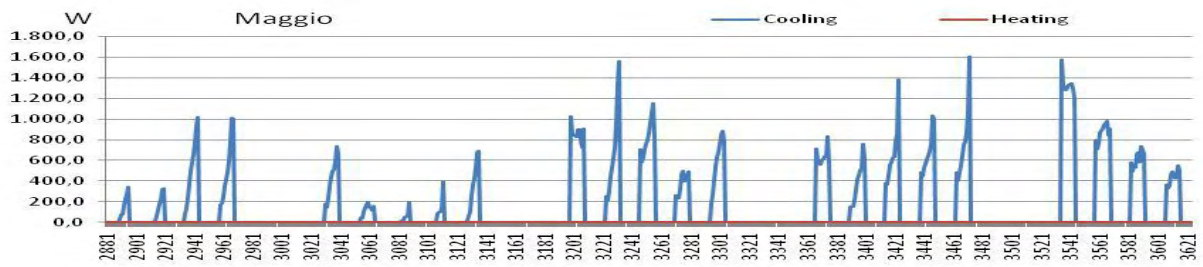
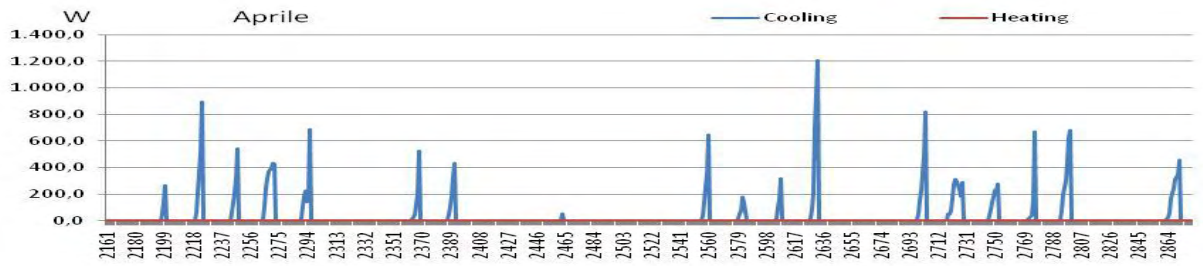
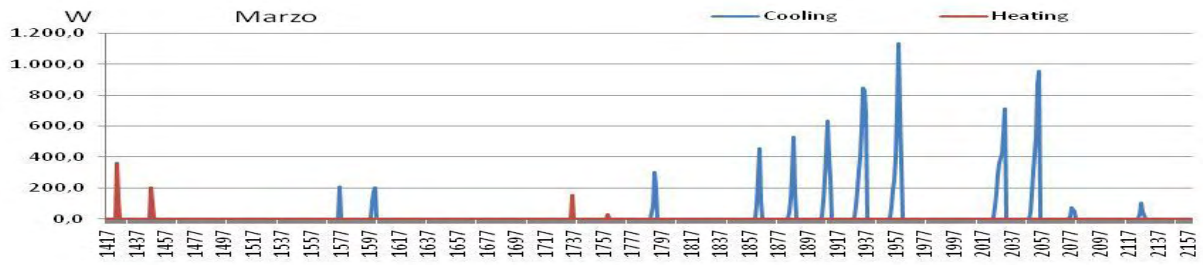
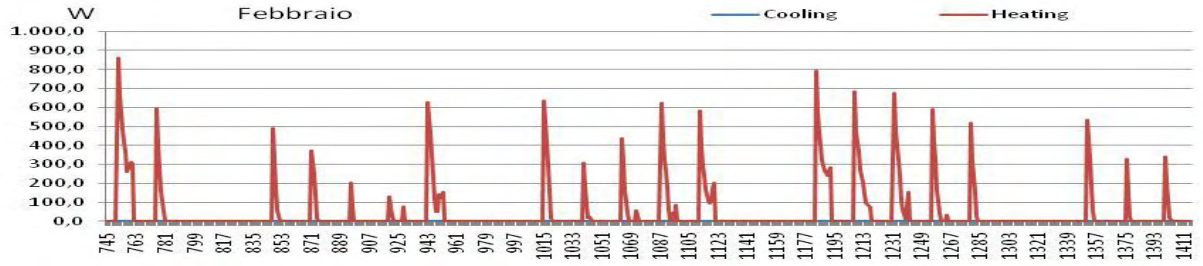
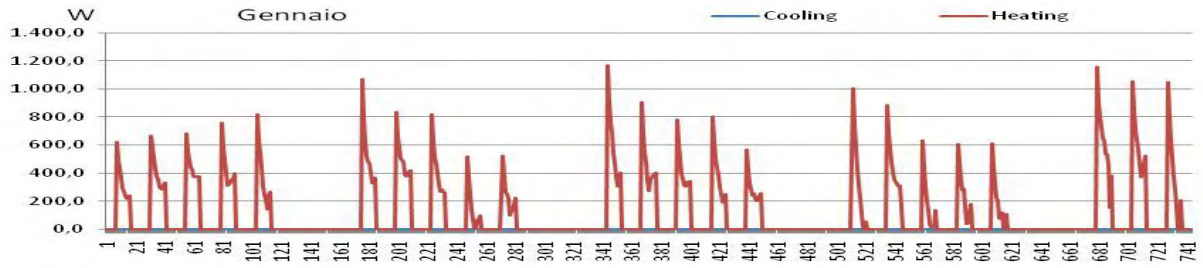


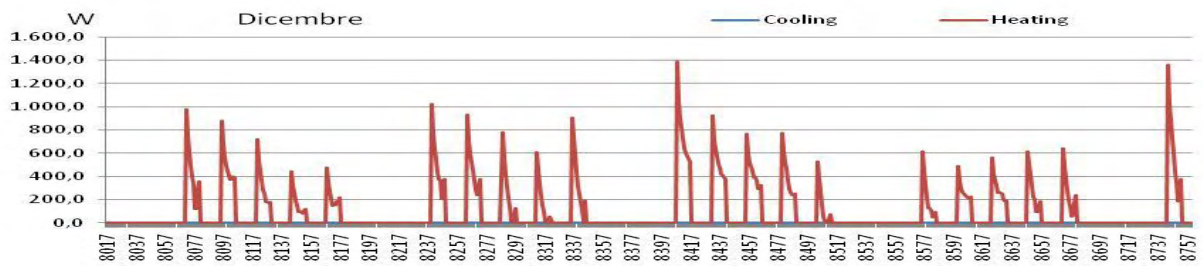
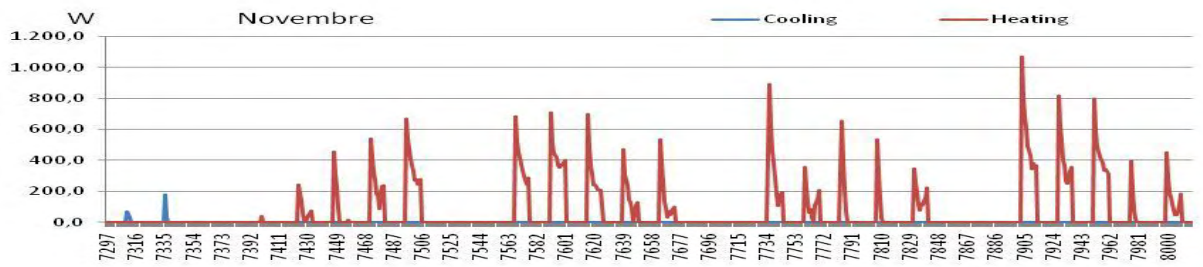
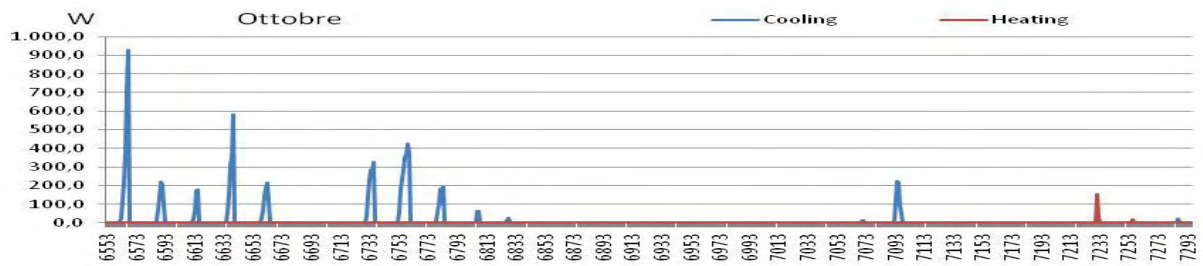
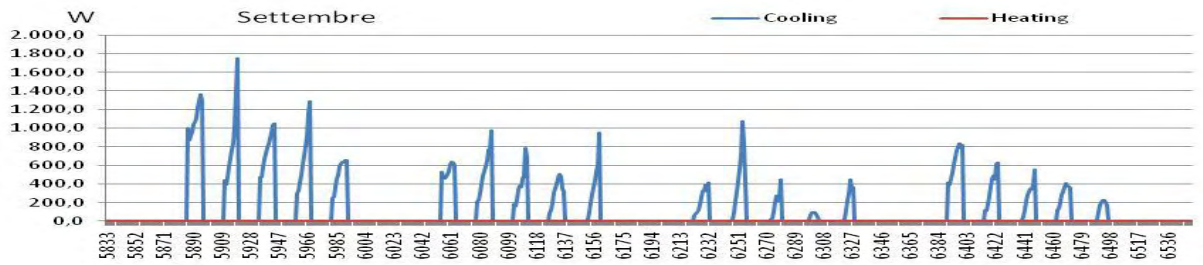
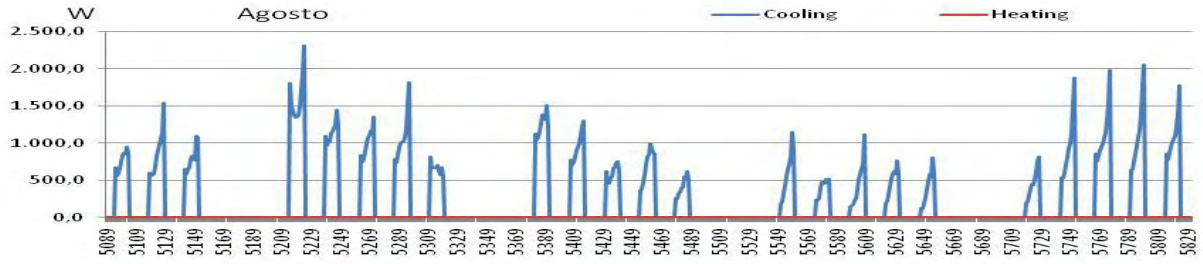
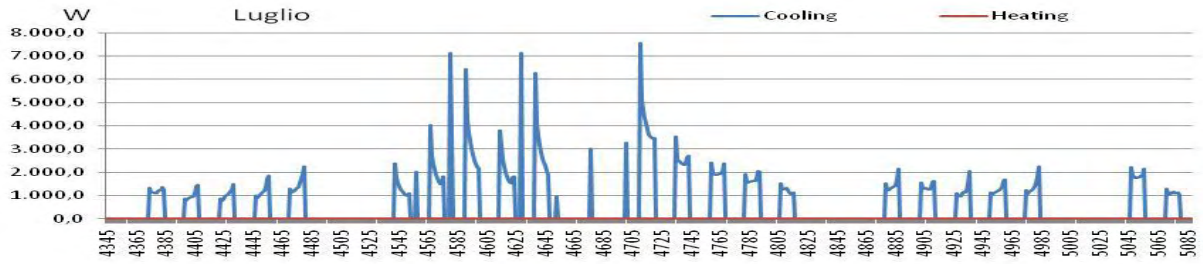
Temperature Test 8



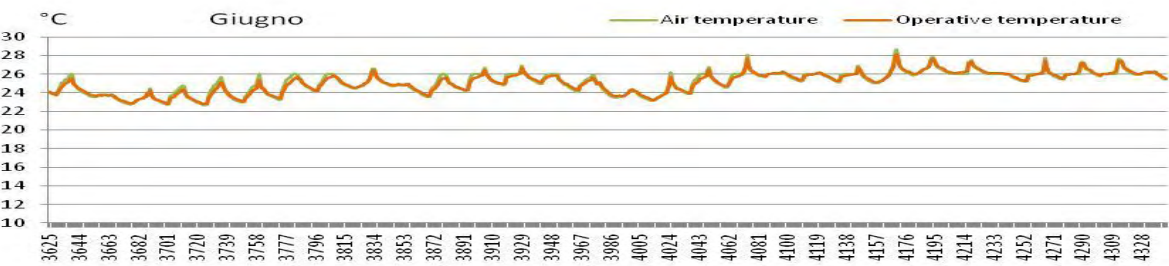
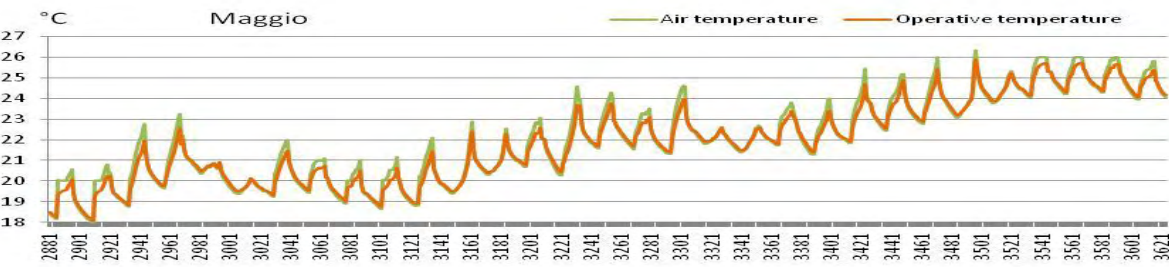
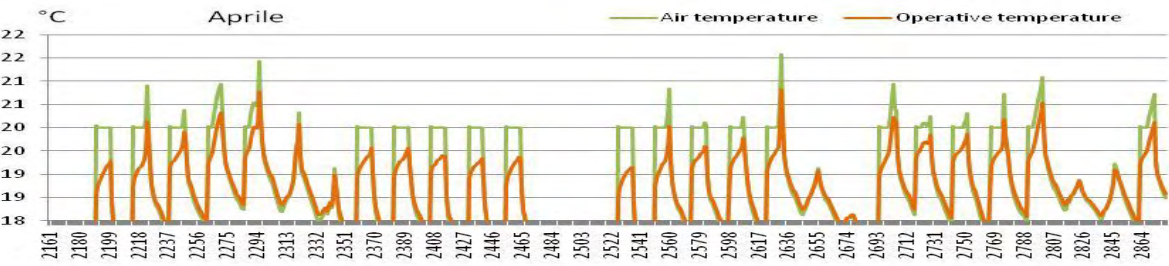
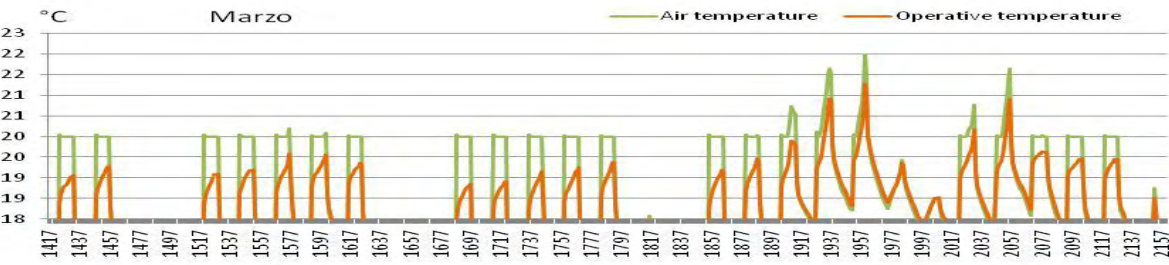
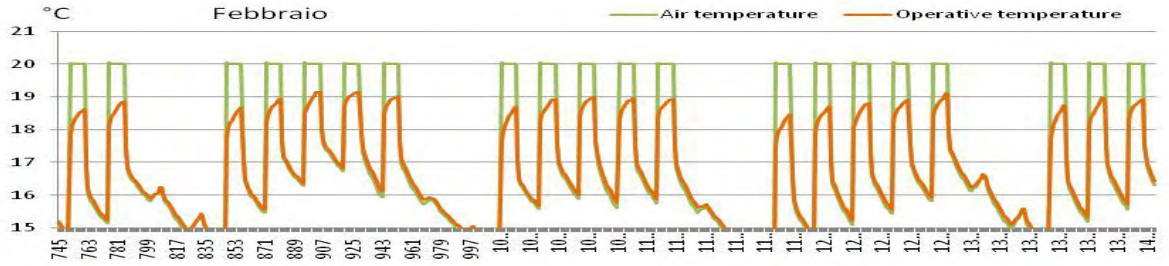
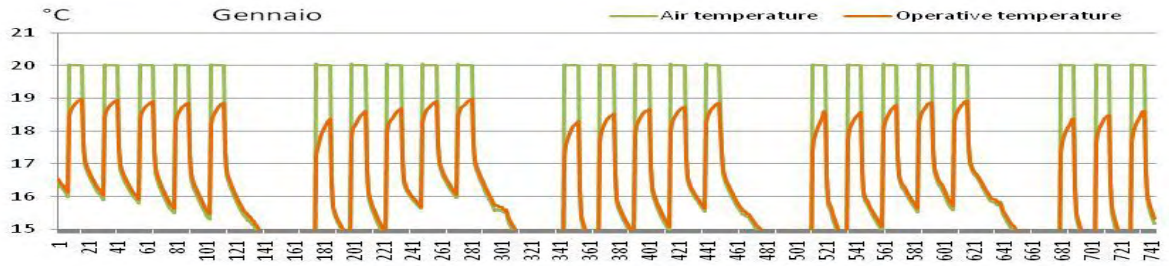


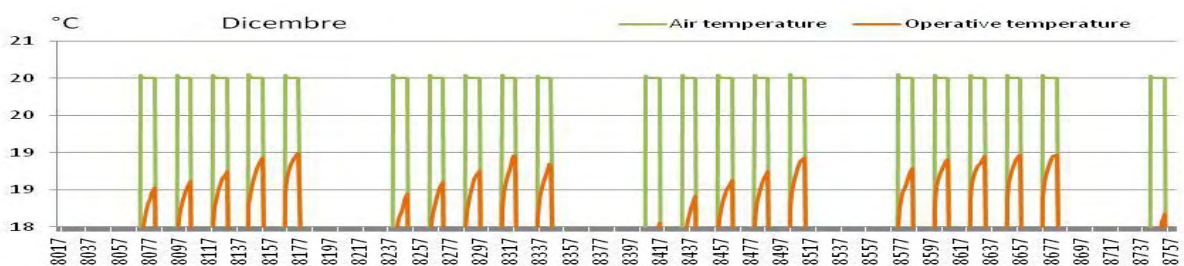
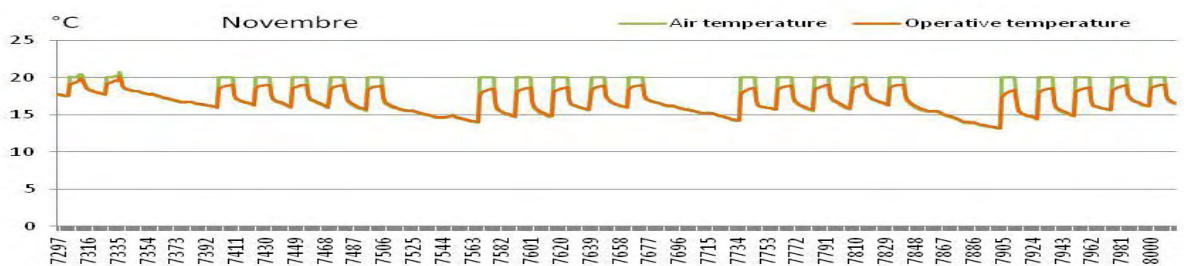
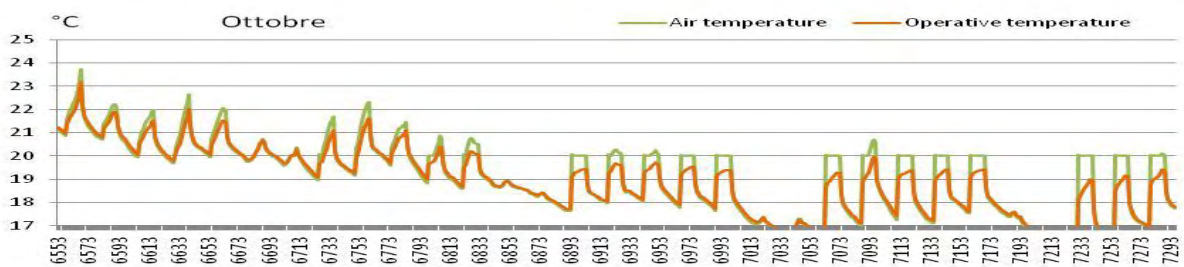
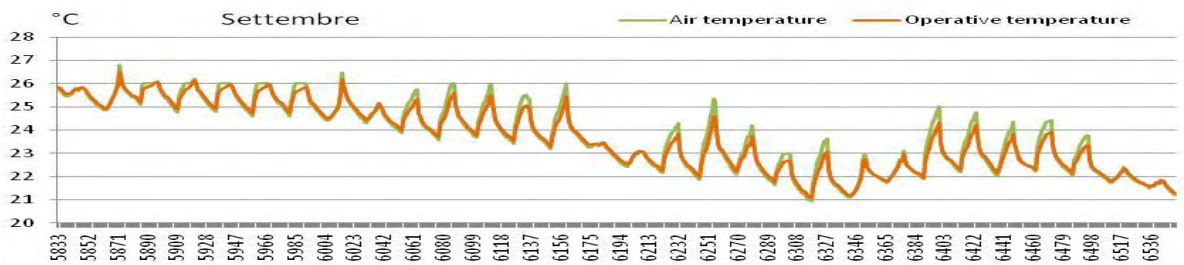
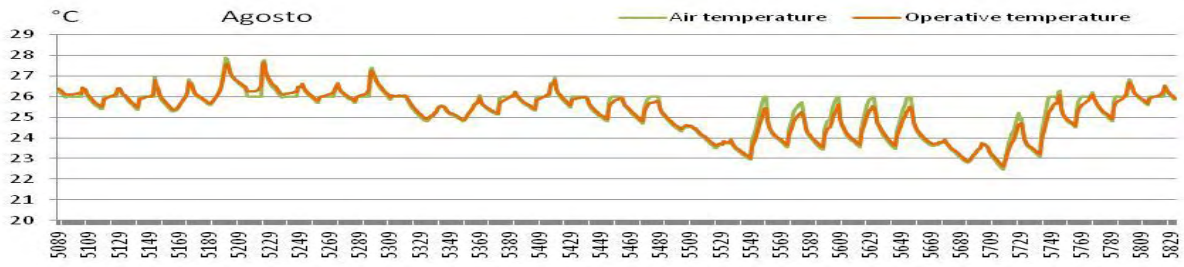
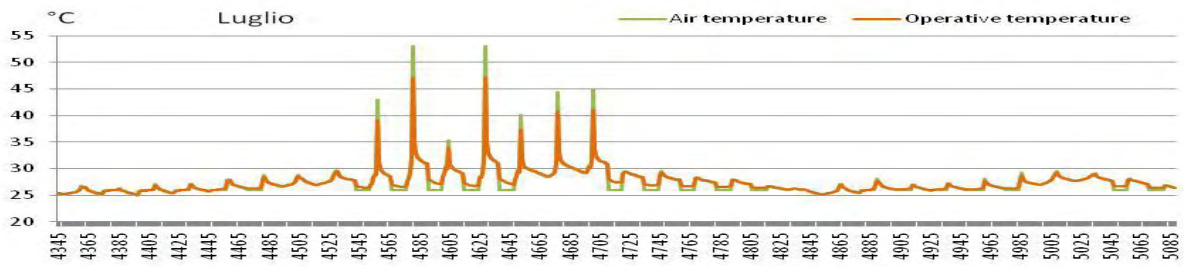
Domanda di climatizzazione Test 8



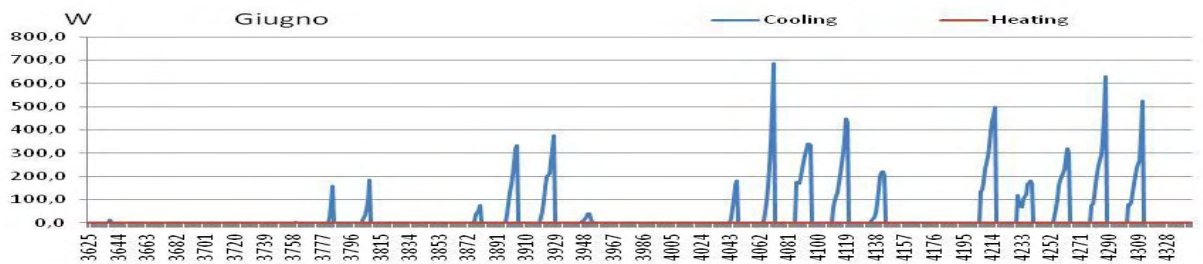
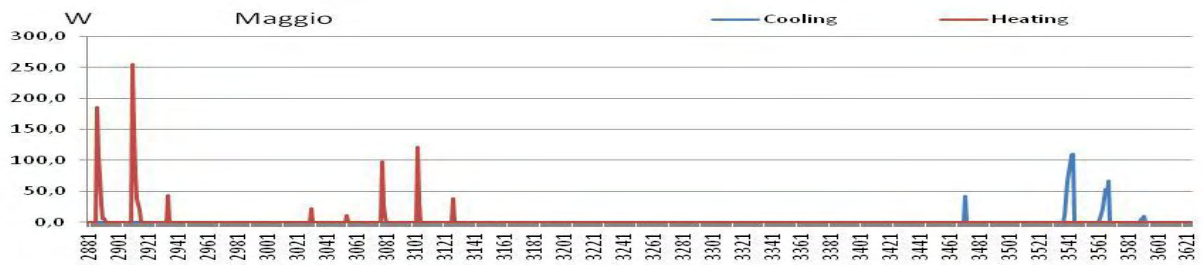
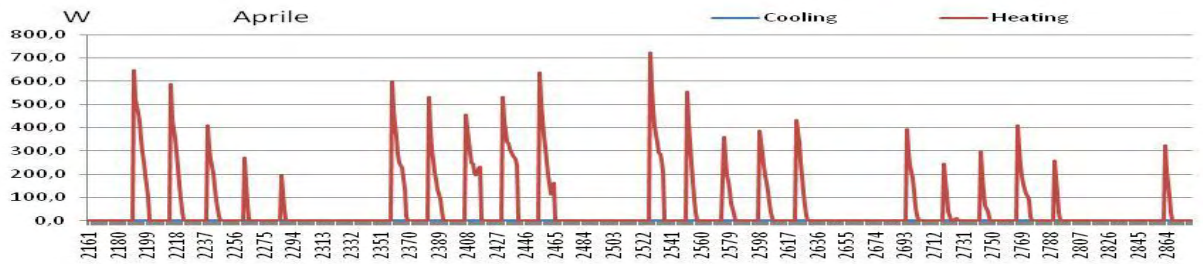
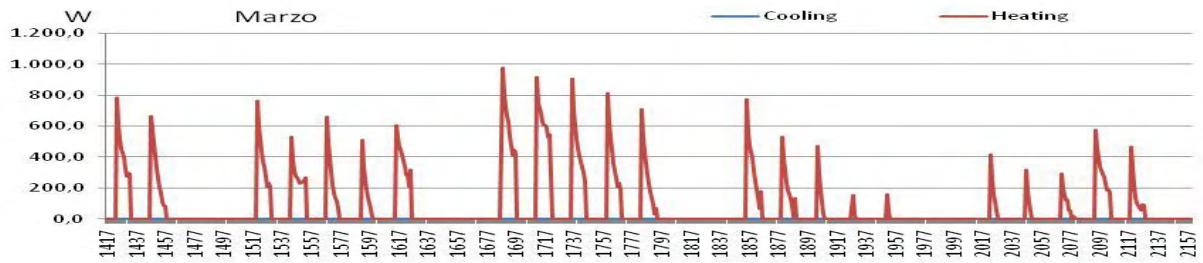
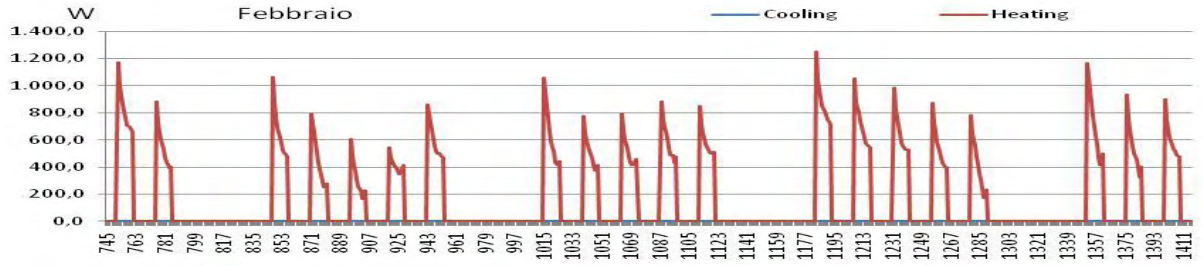
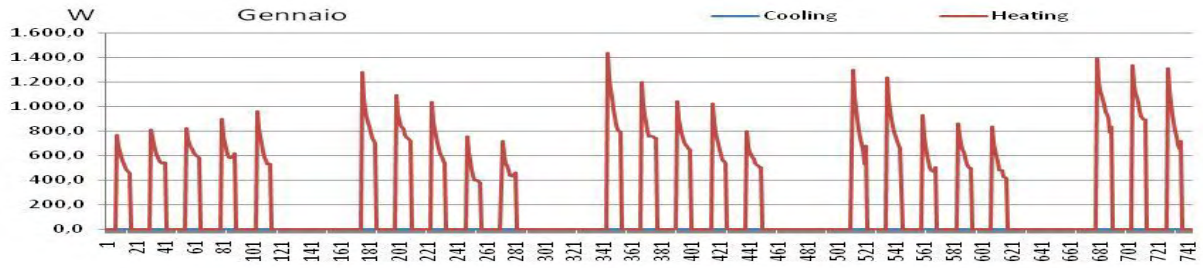


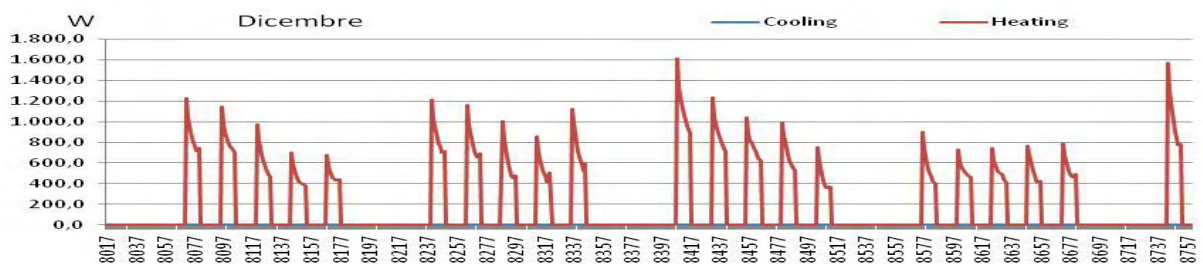
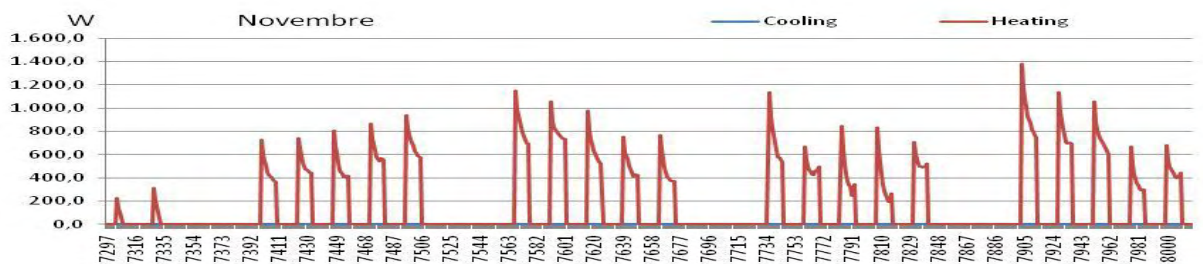
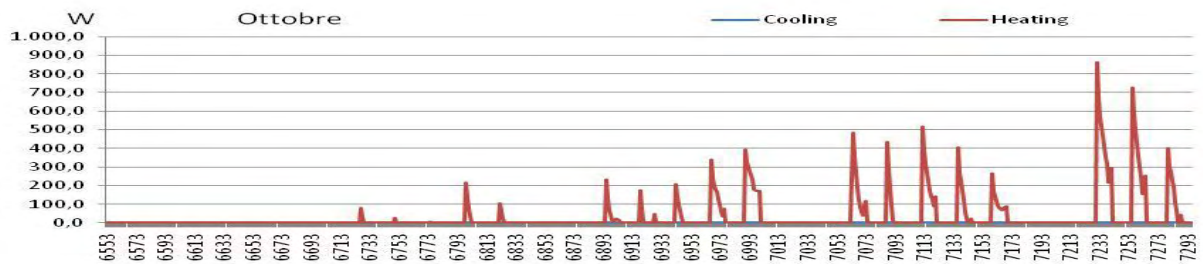
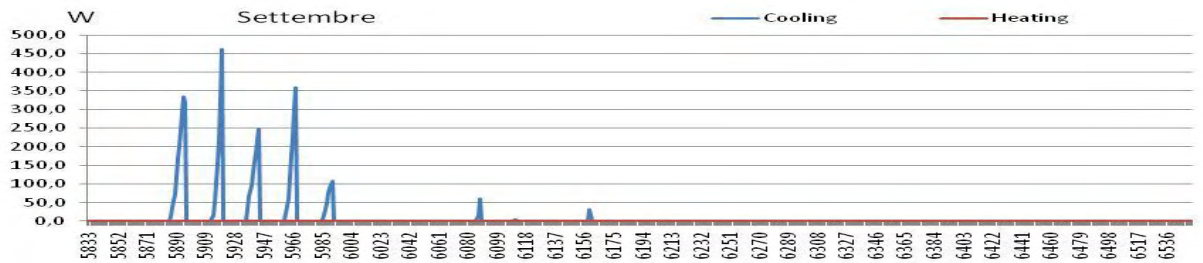
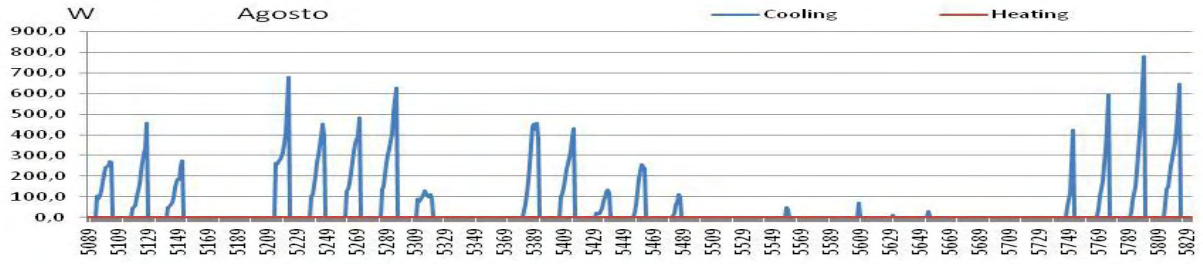
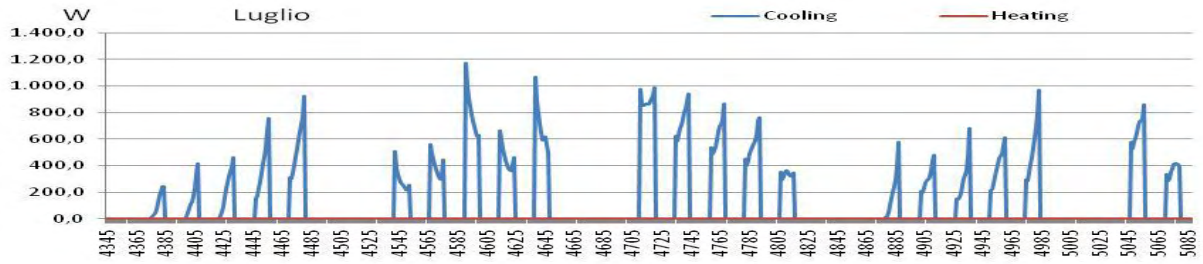
Temperature Test 9



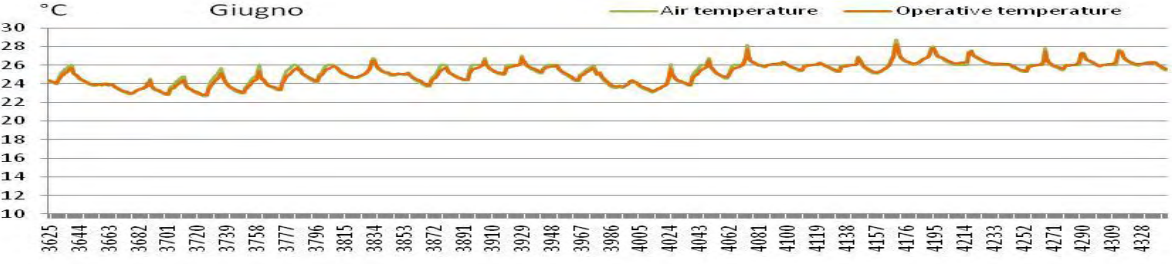
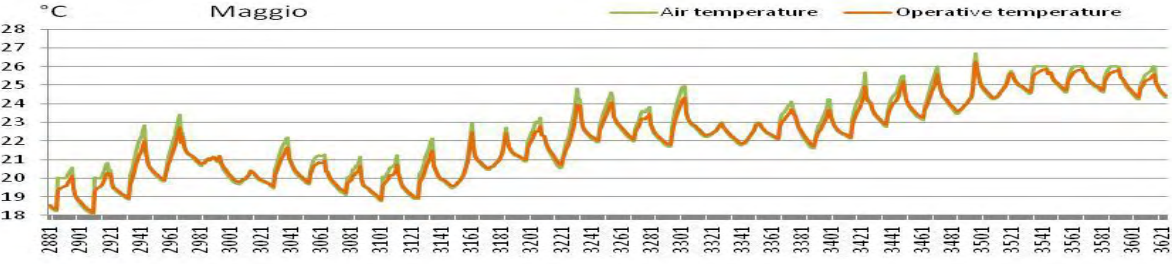
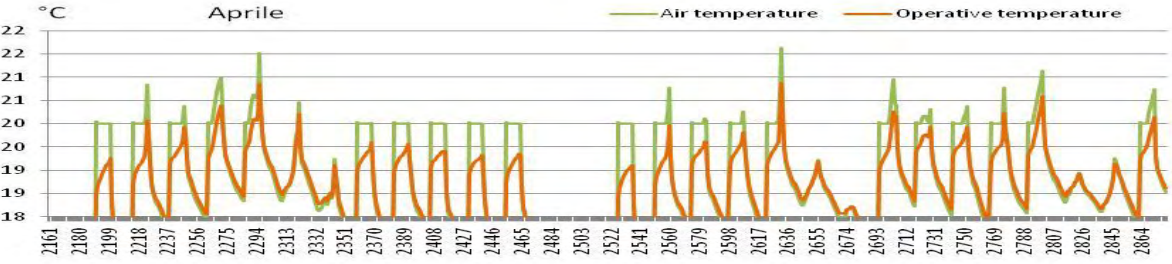
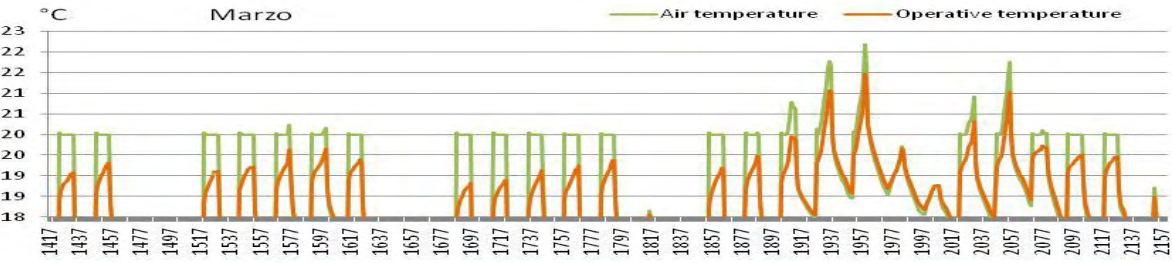
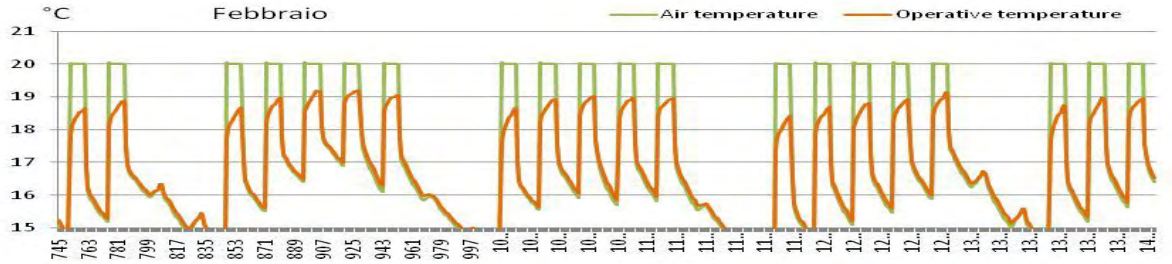
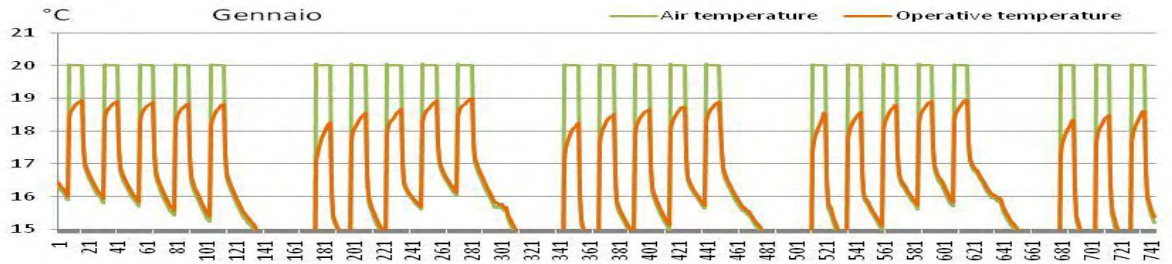


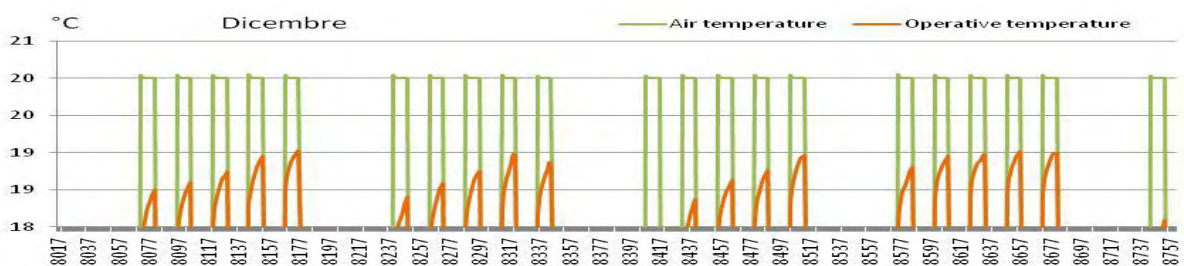
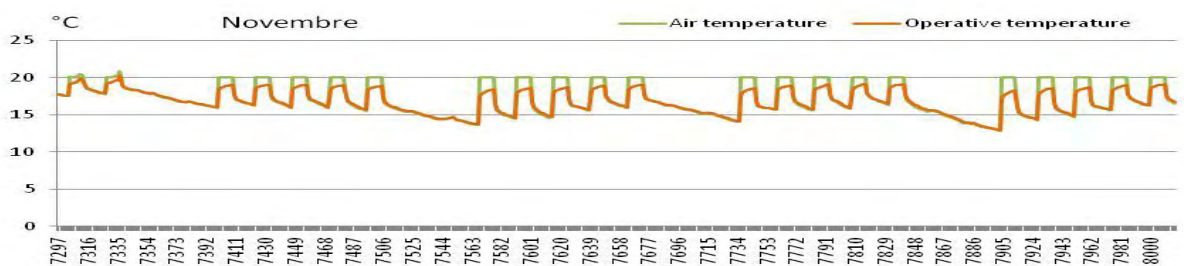
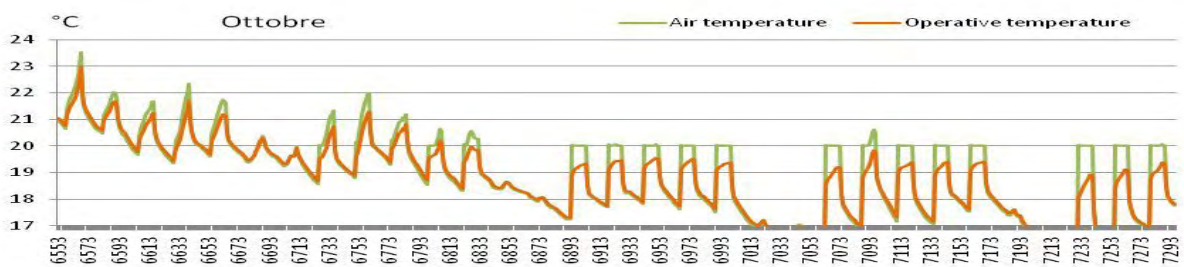
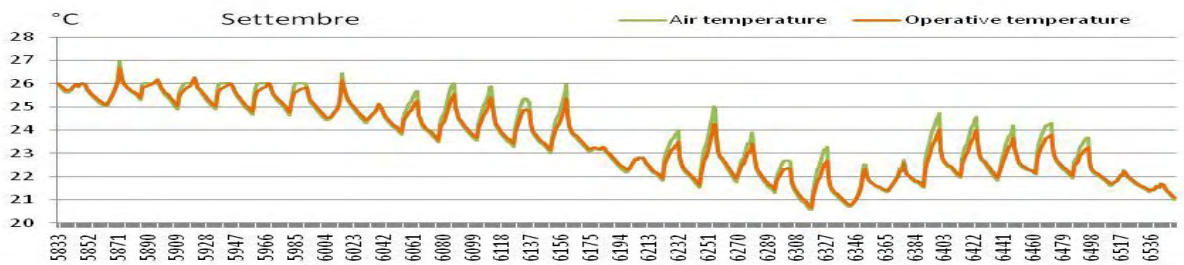
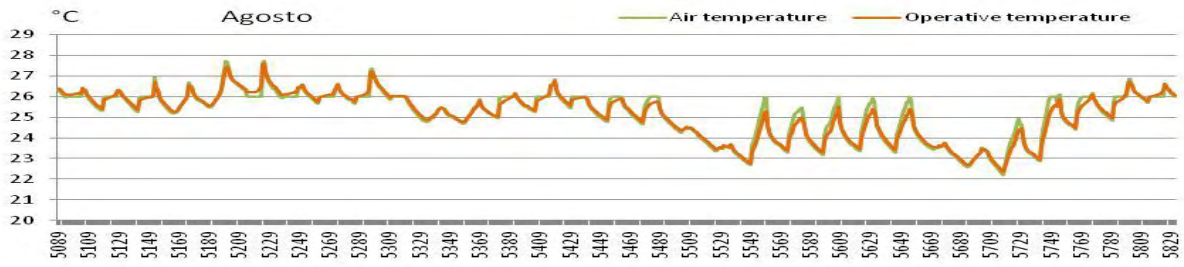
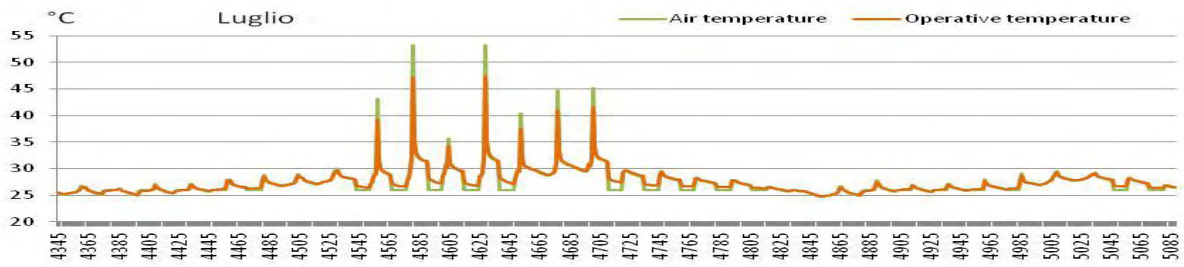
Domanda di climatizzazione Test 9



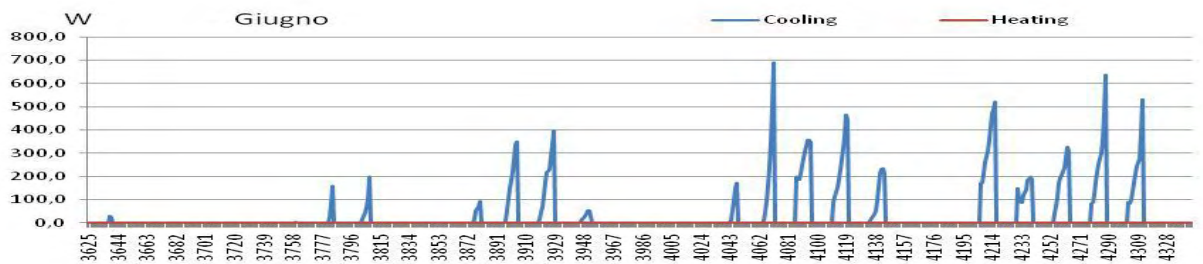
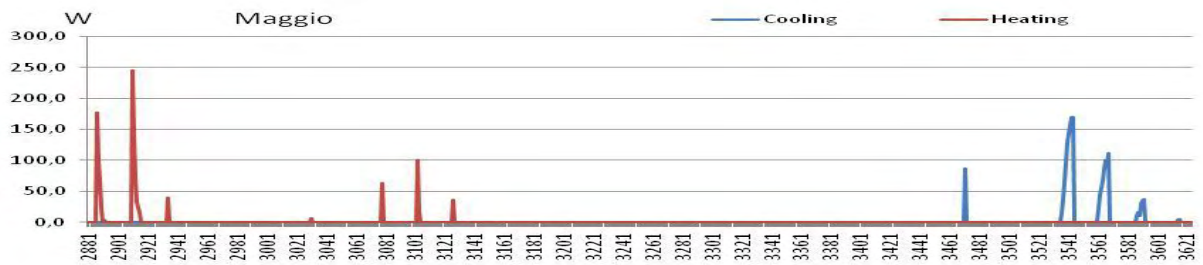
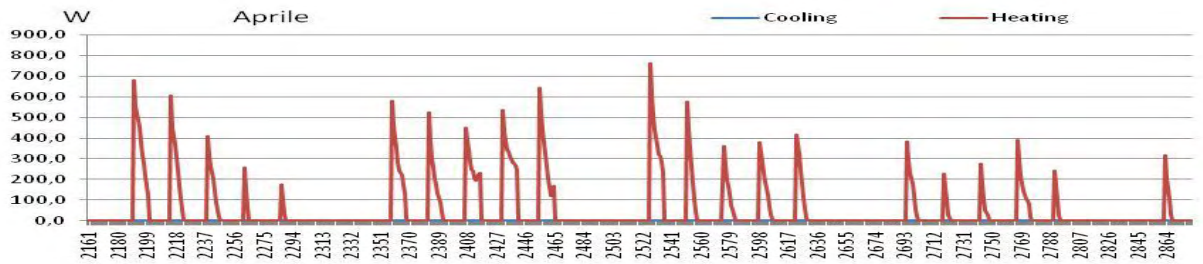
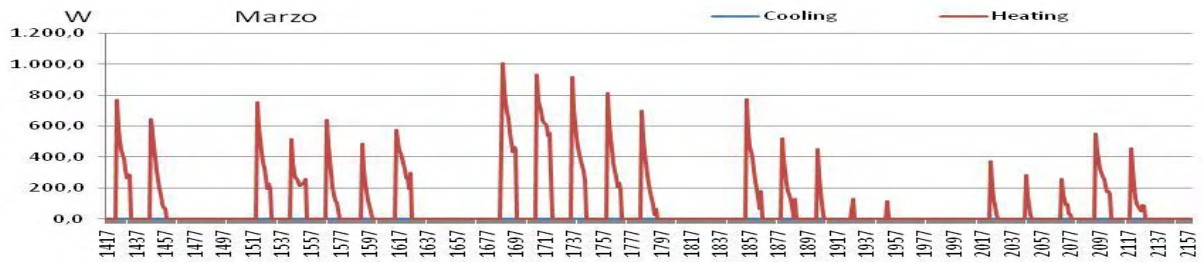
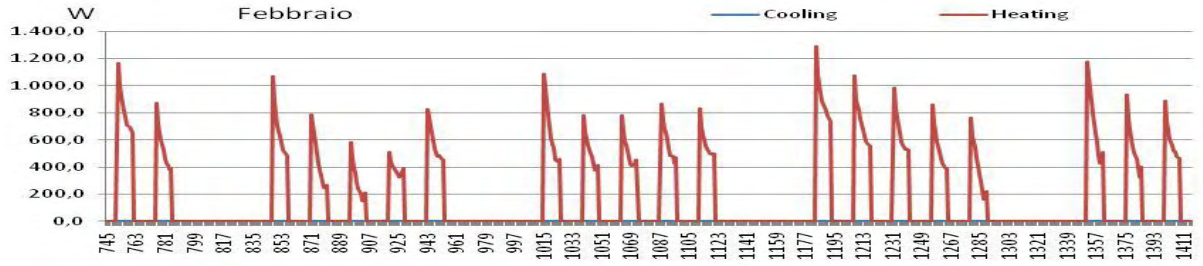
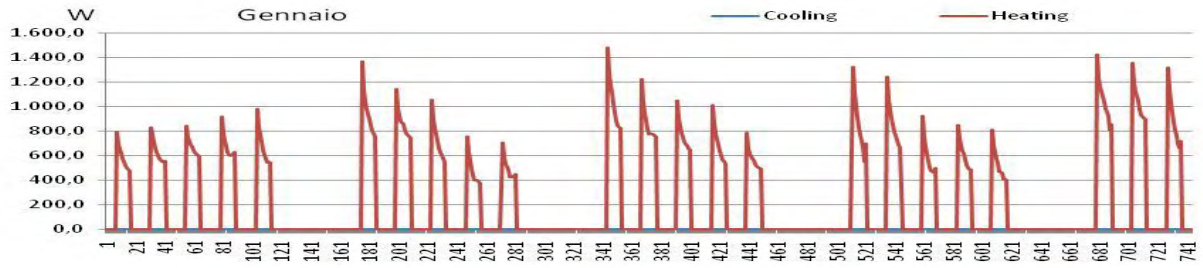


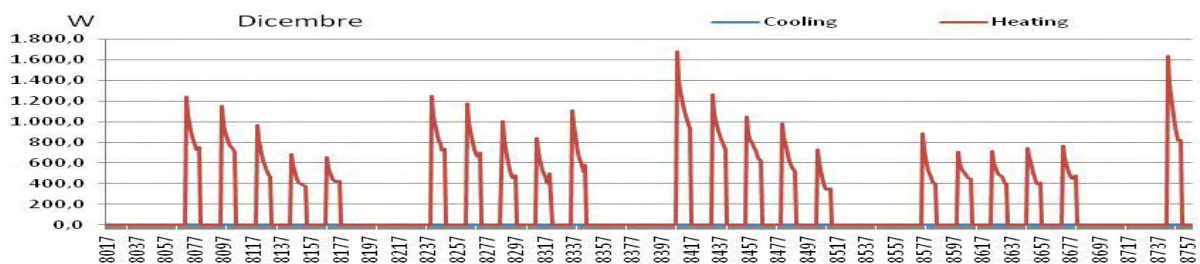
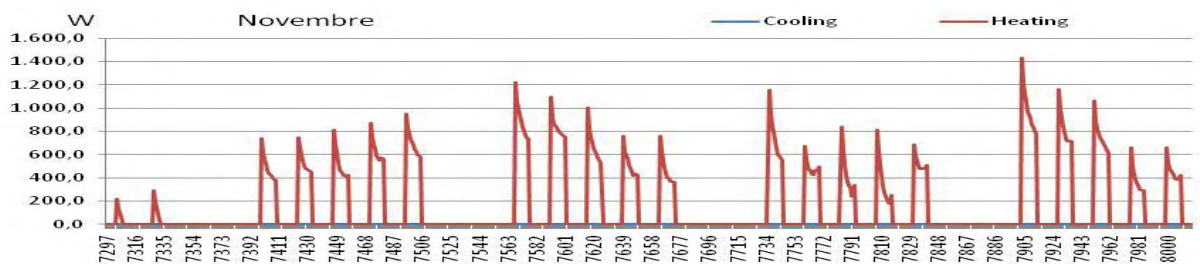
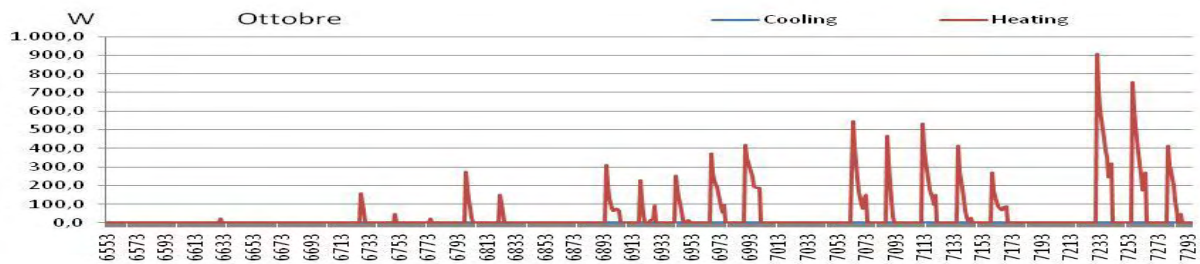
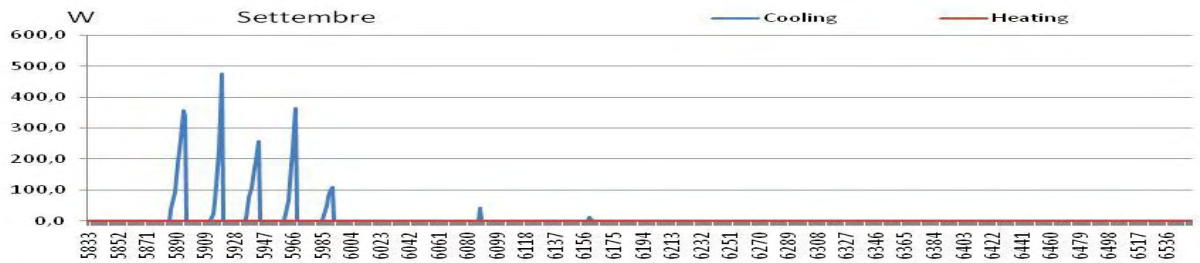
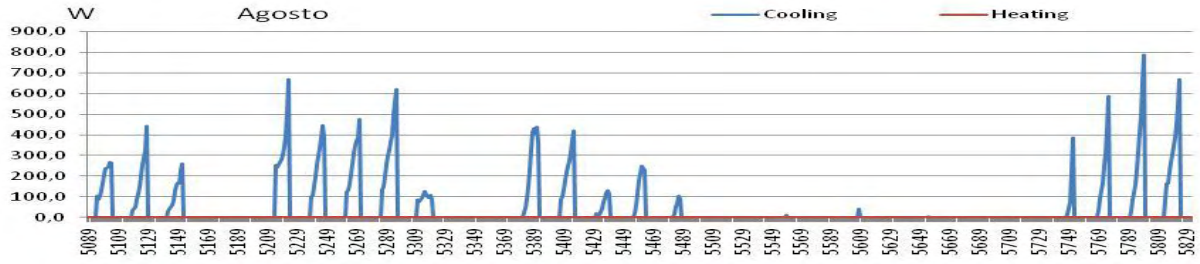
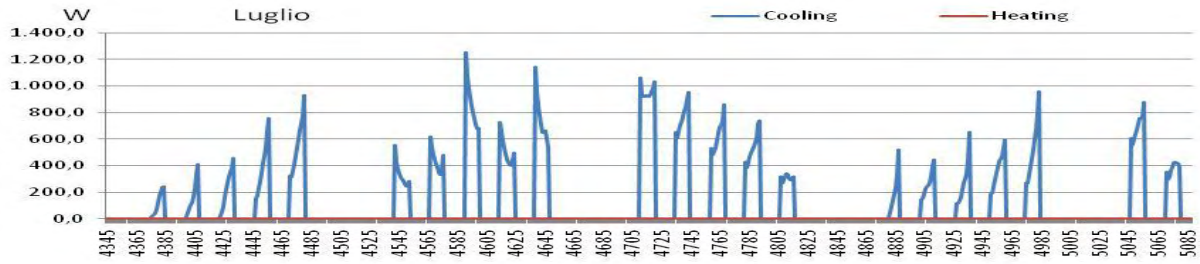
Temperature Test 10



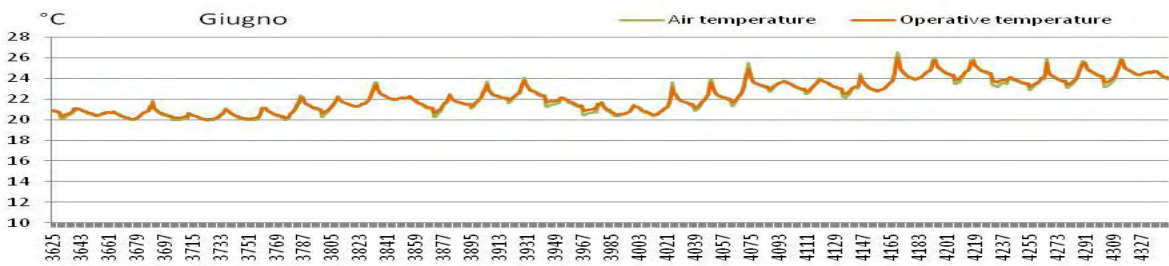
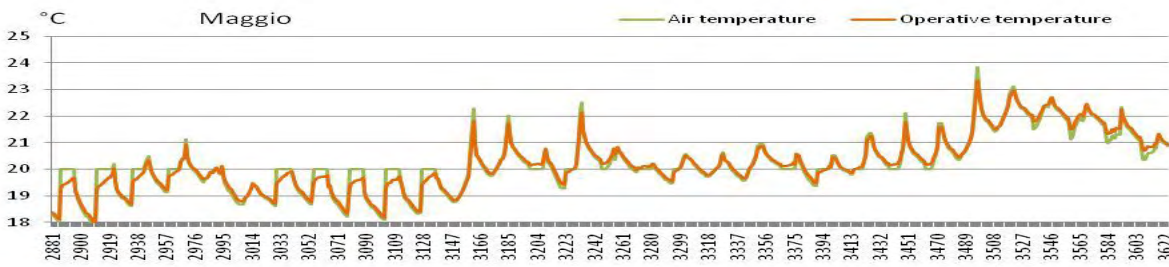
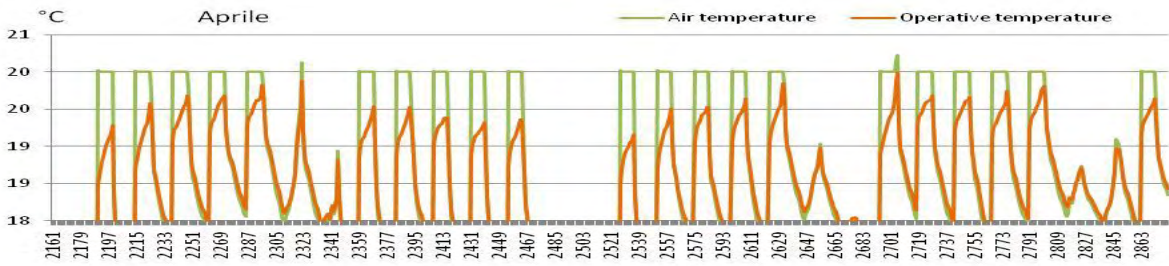
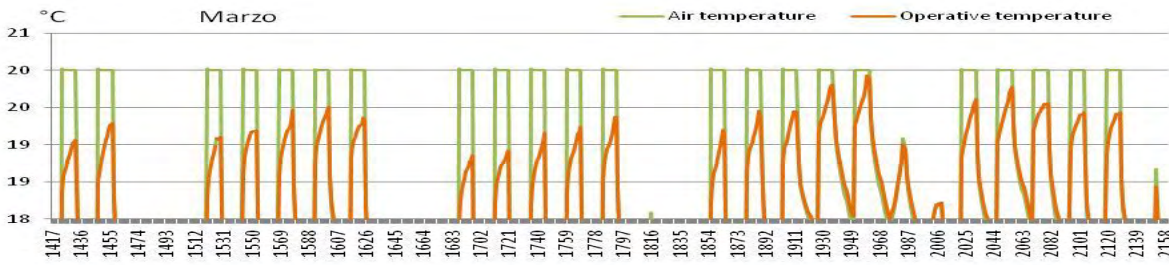
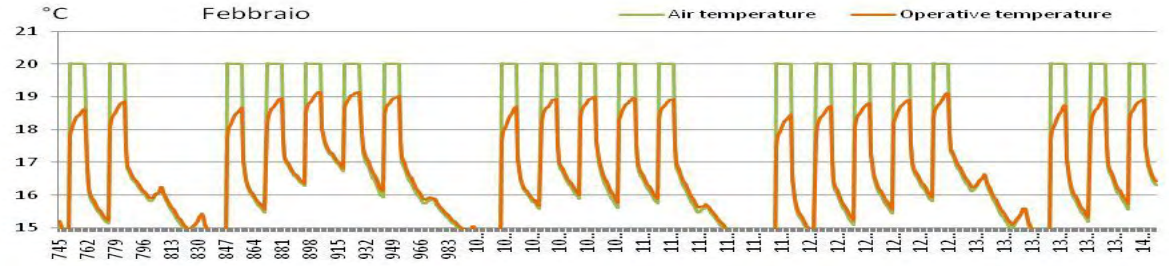
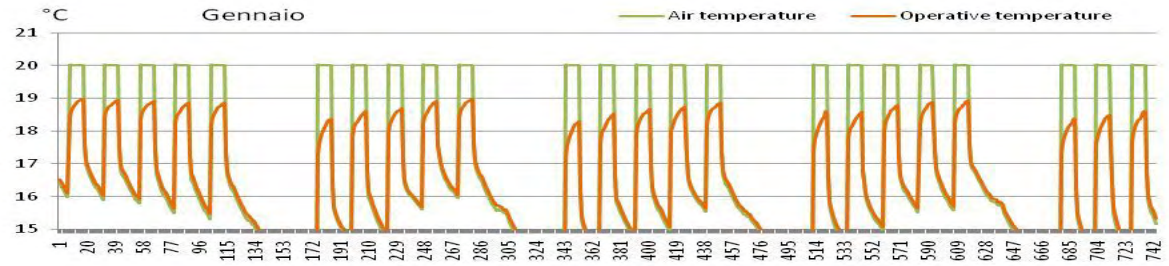


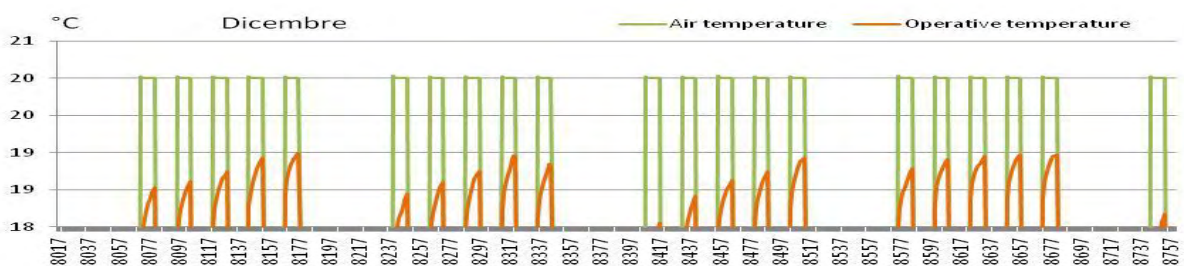
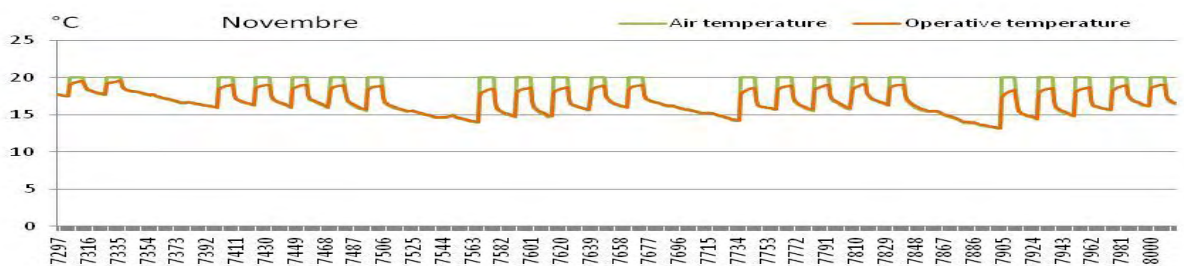
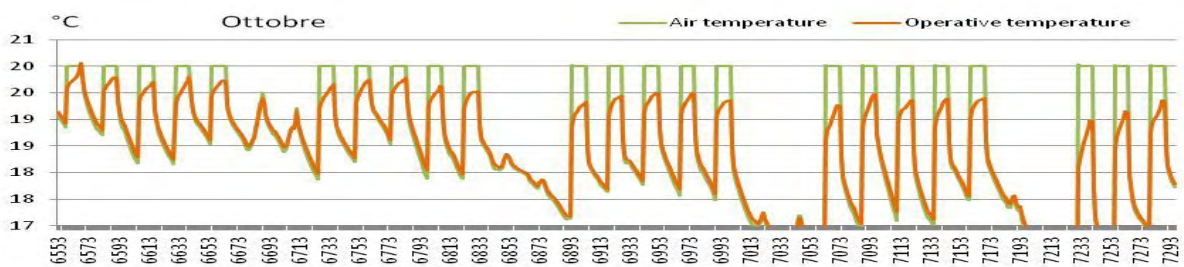
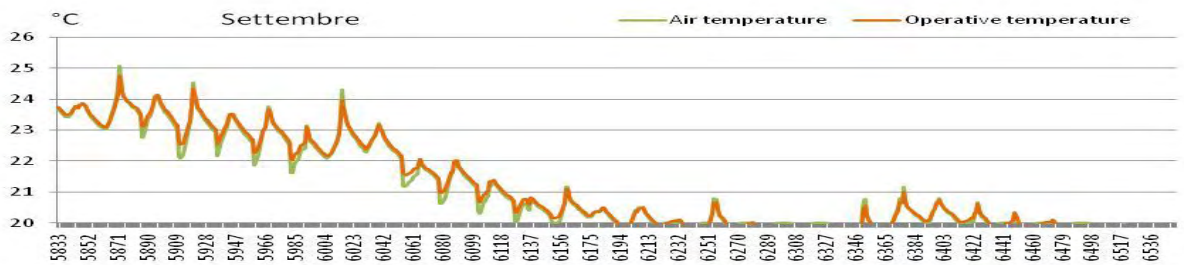
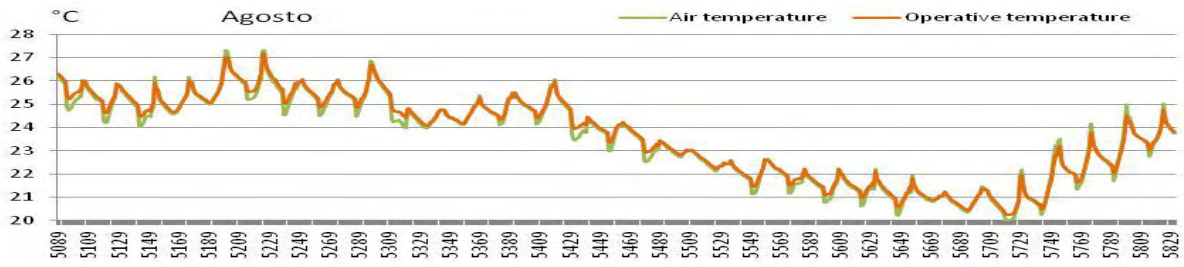
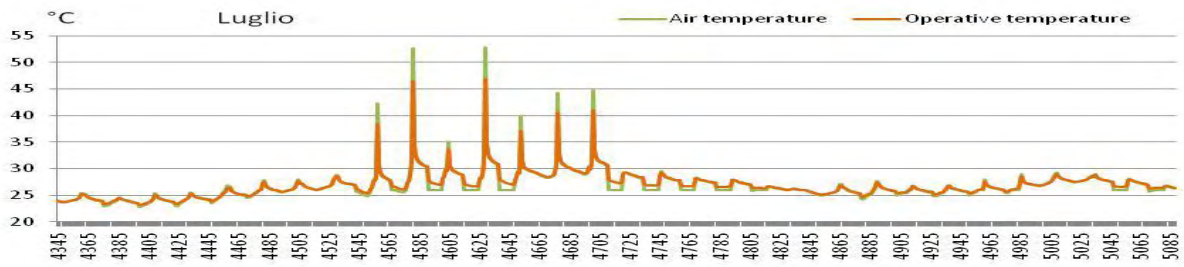
Domanda di climatizzazione Test 10



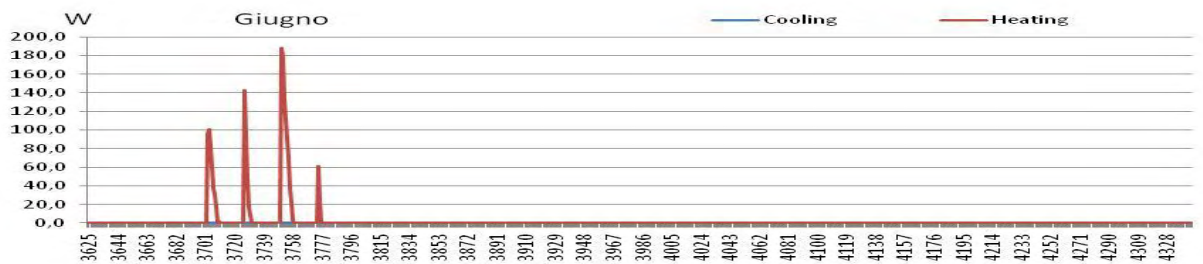
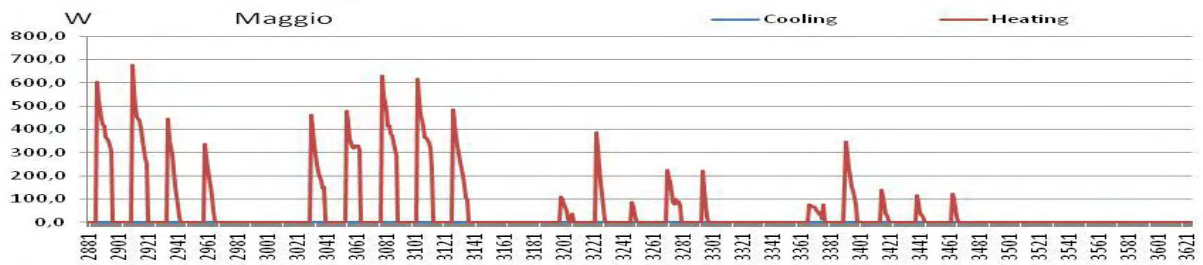
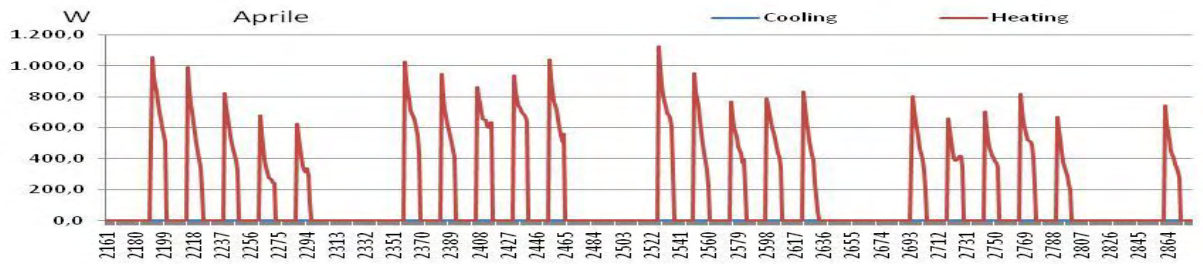
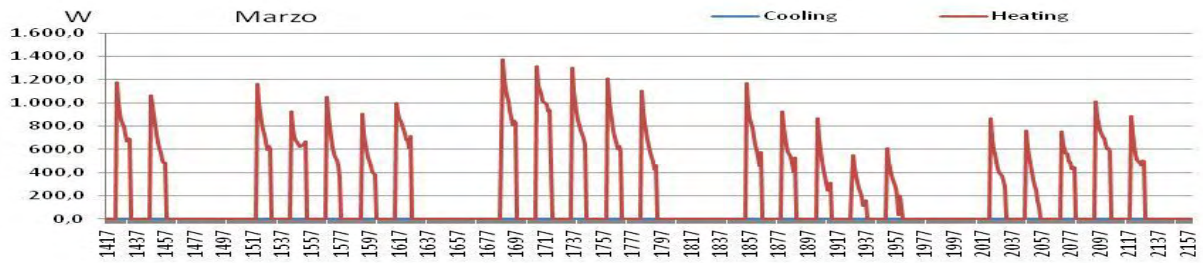
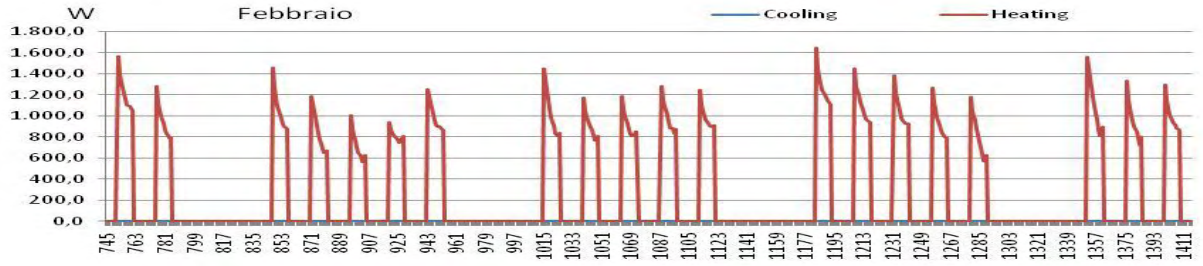
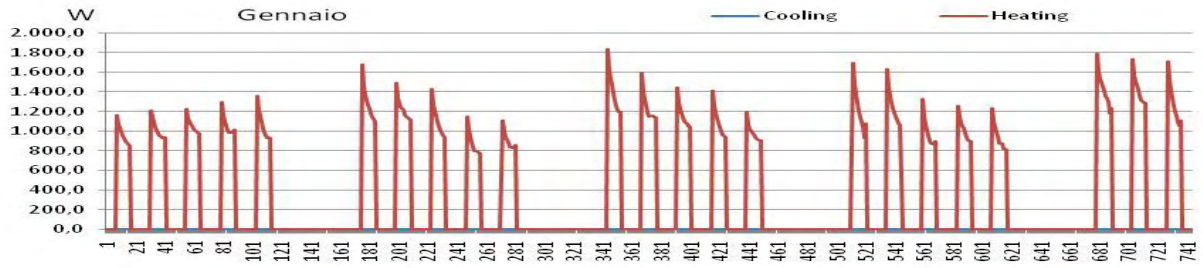


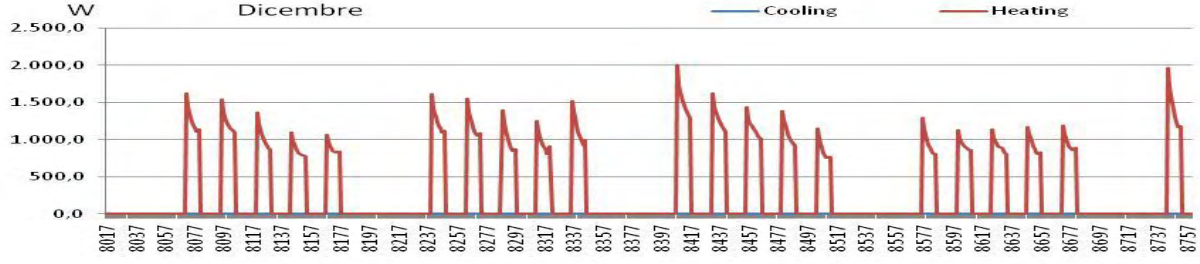
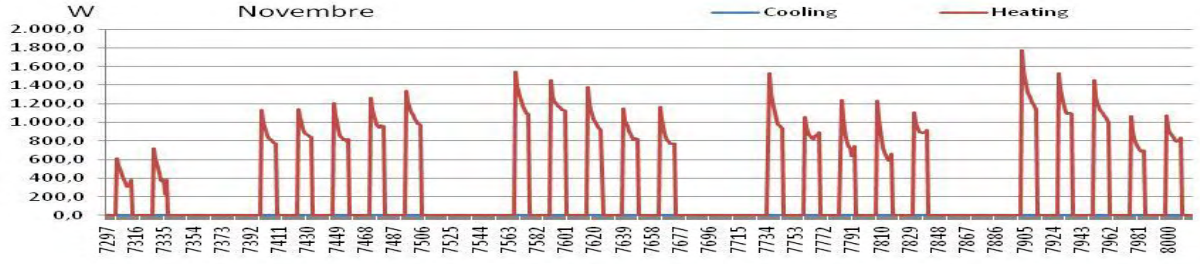
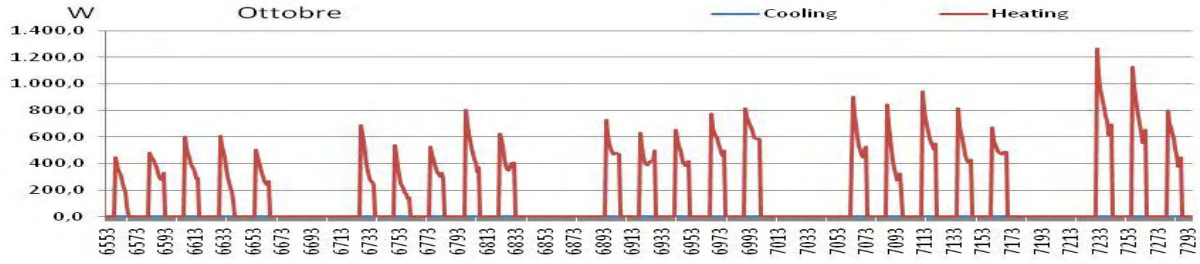
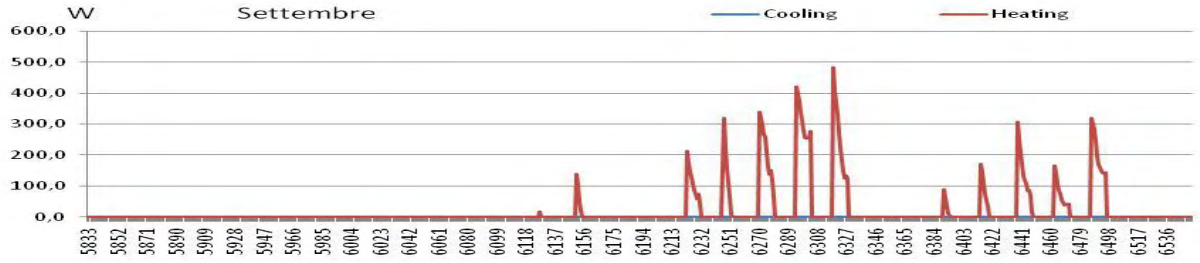
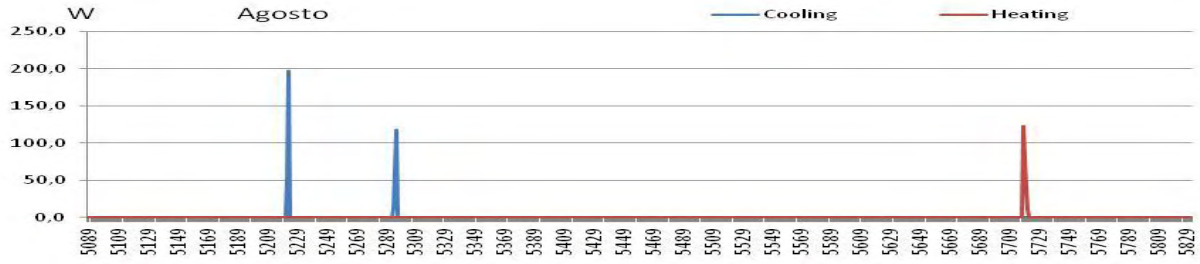
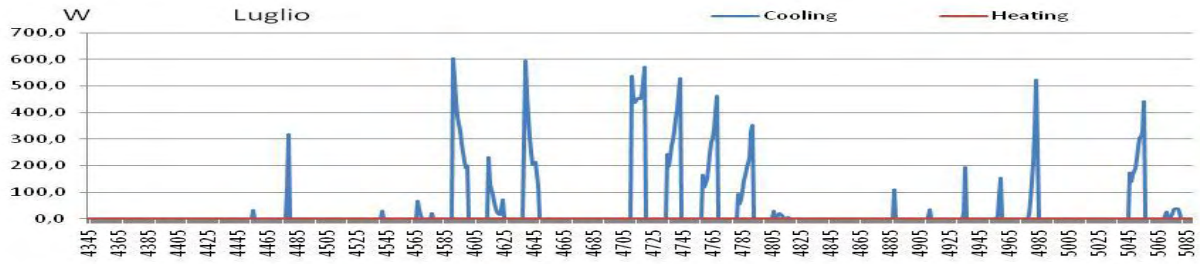
Temperature Test 11



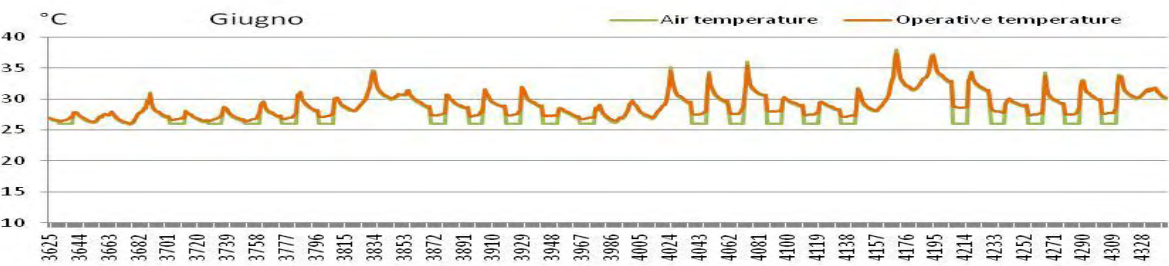
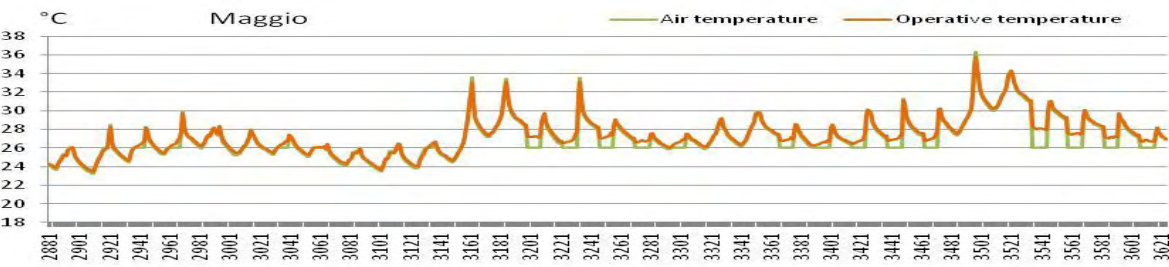
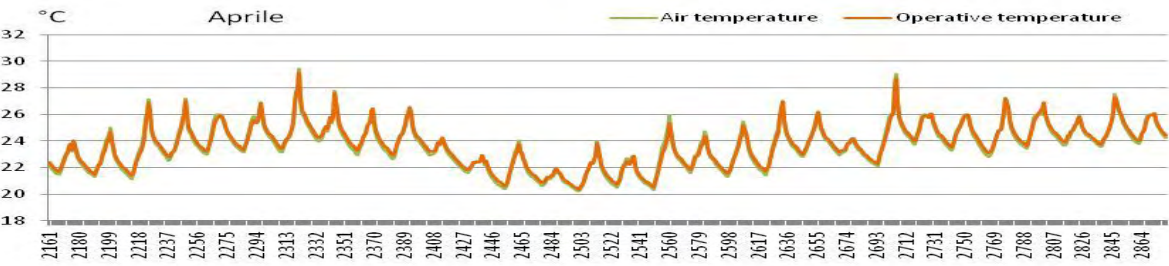
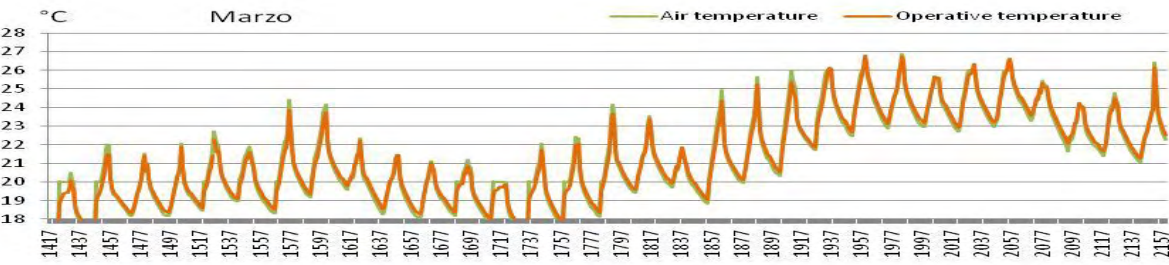
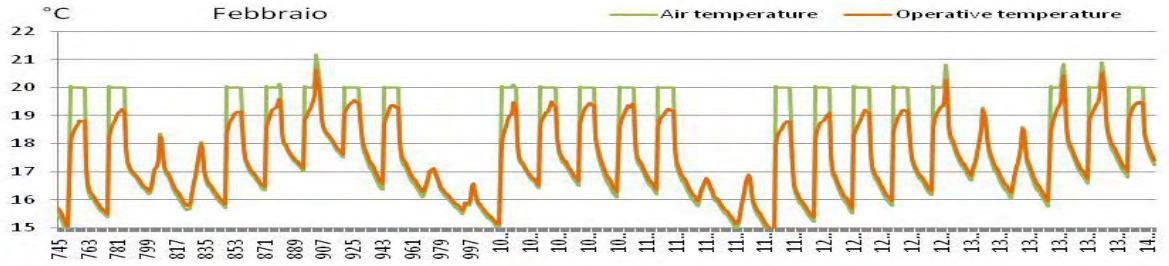
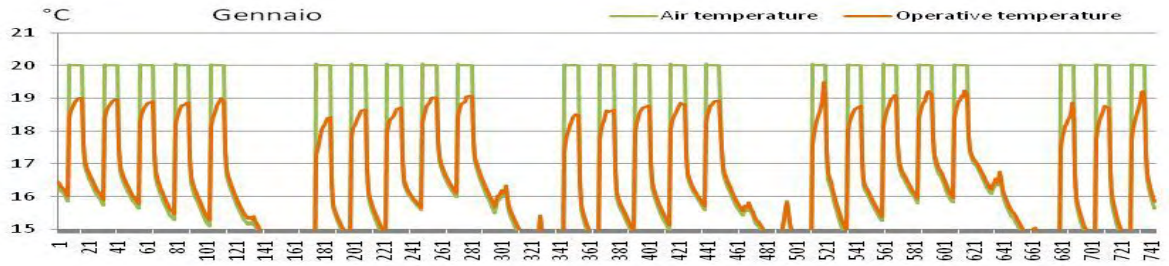


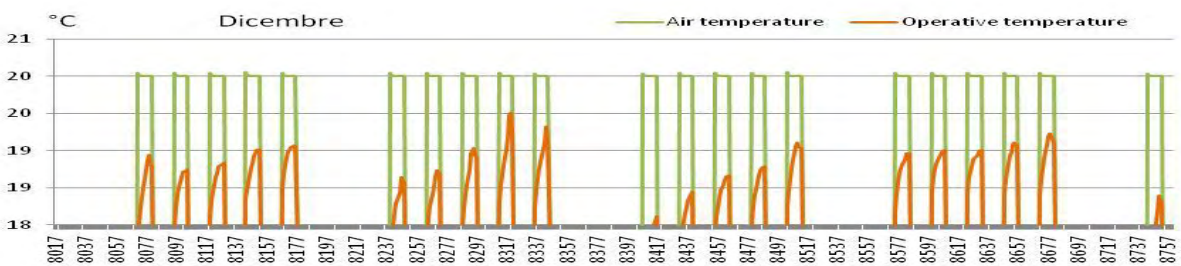
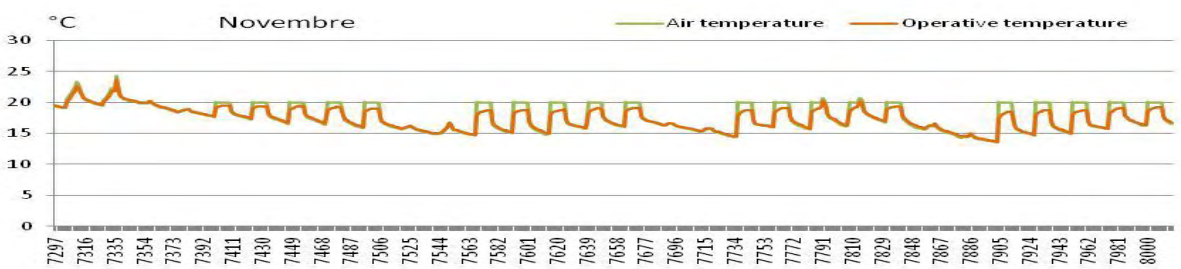
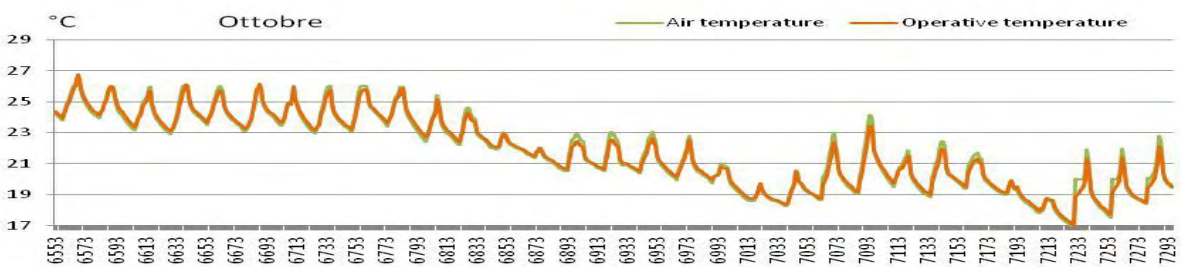
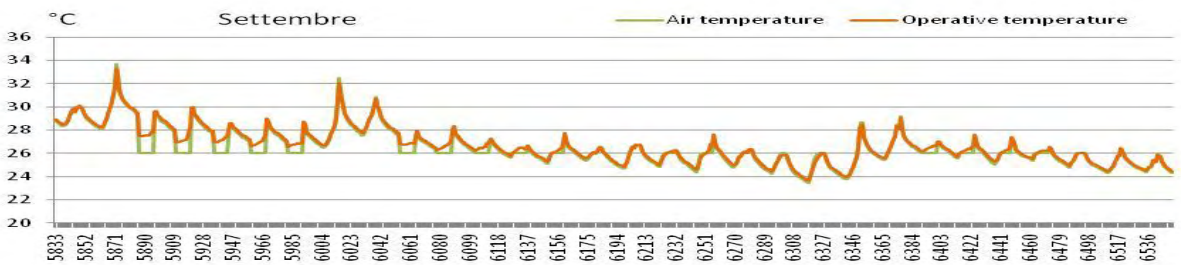
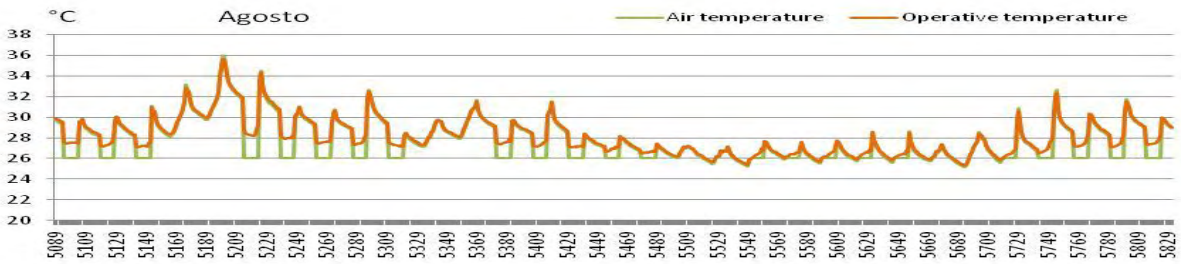
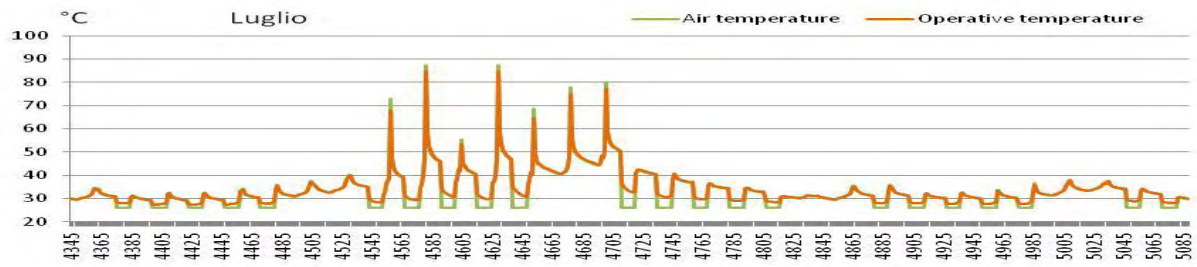
Domanda di climatizzazione Test 11



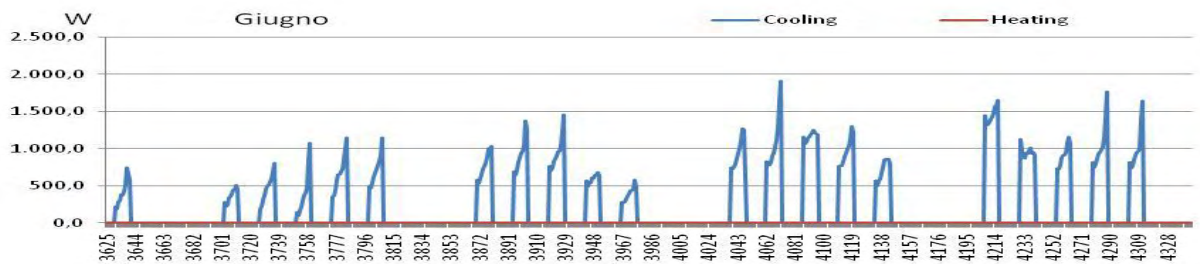
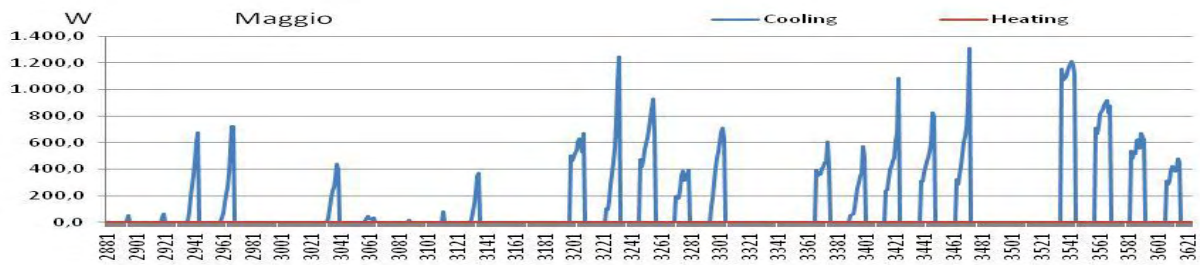
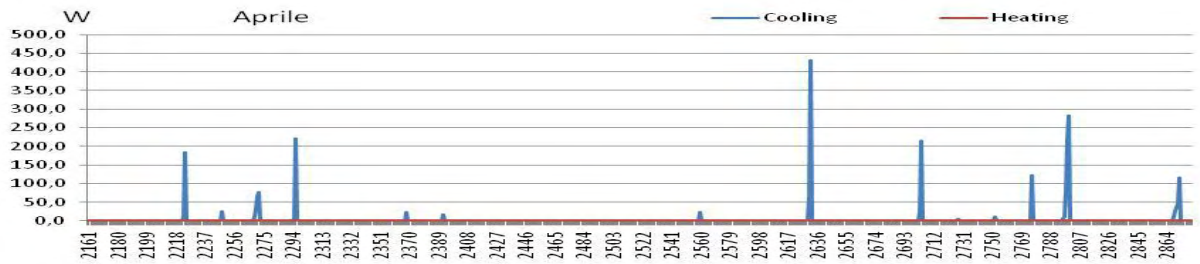
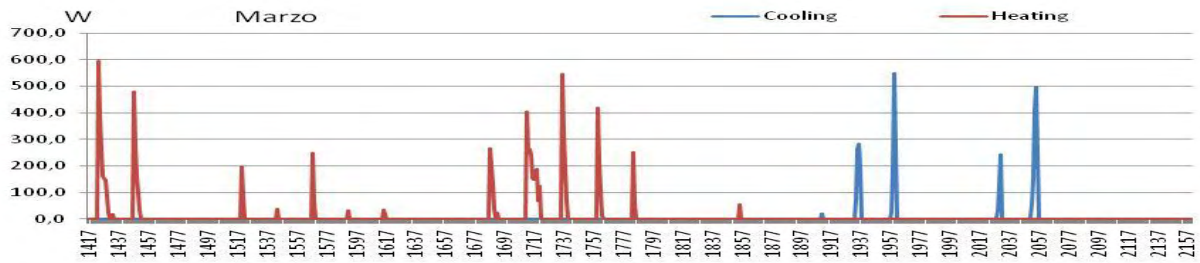
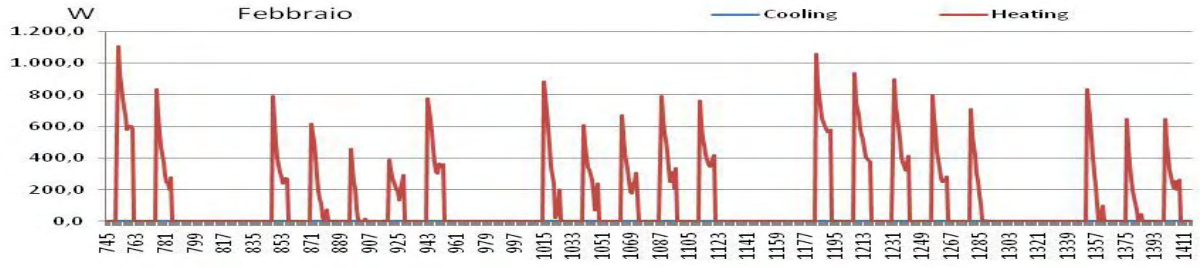
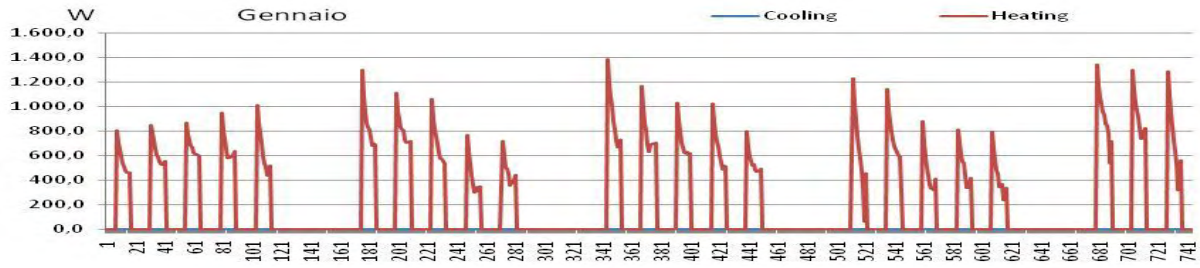


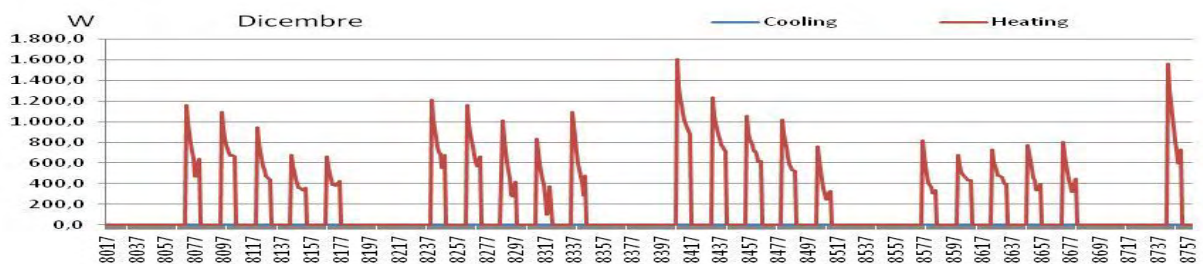
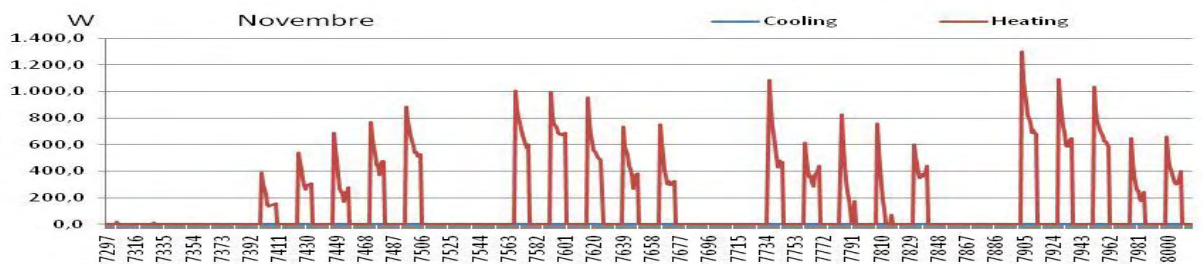
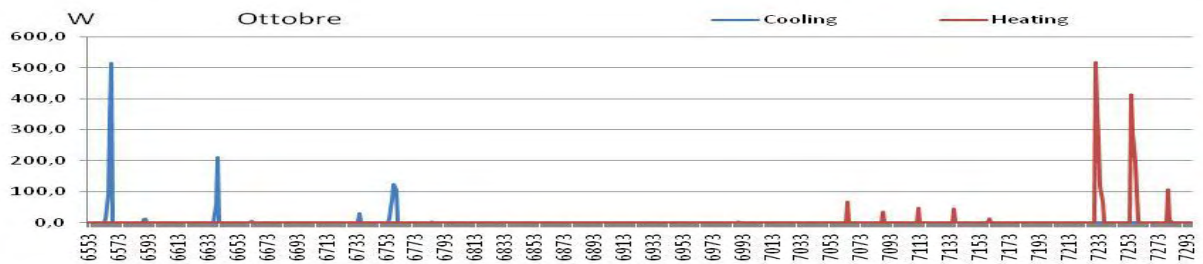
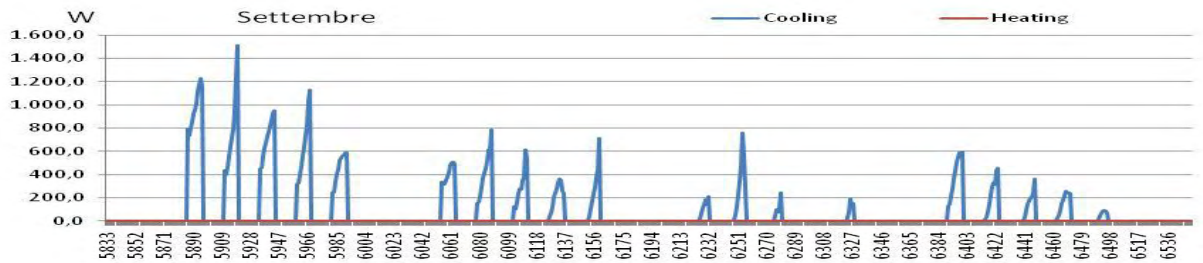
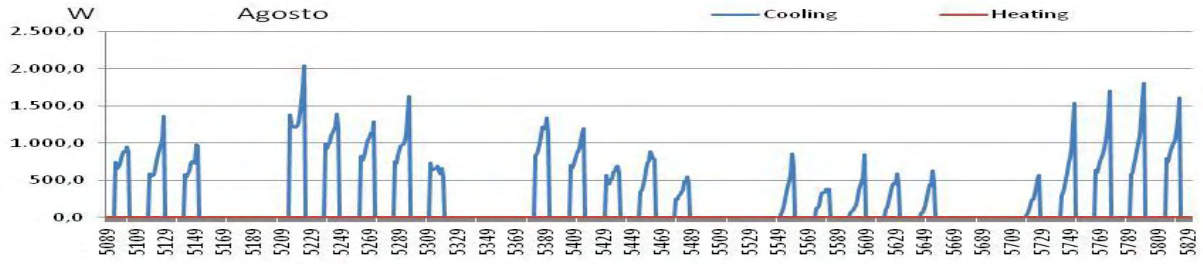
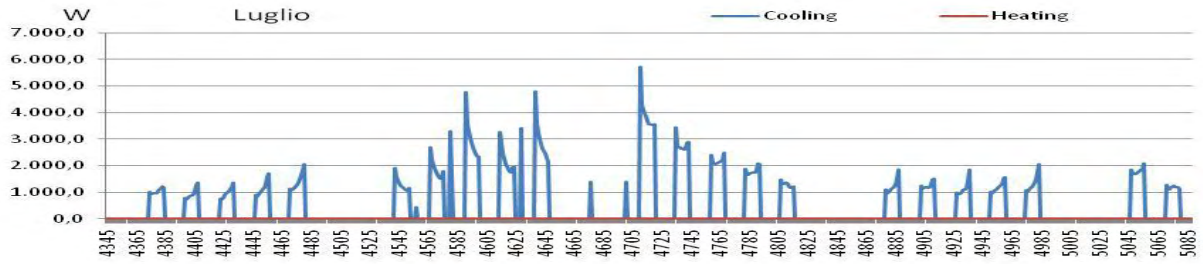
Temperature Test 12





Domanda di climatizzazione Test 12





C. Dettaglio dei dati di input per le regressioni statistiche

Clima

I dati climatici, sintetizzati nel capitolo 10, sono quelli contenuti nei file sotto elencati in formato .epw, disponibili on line sul sito del *Department of Energy* degli Stati Uniti all'indirizzo:

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=ITA/cname=Italy

ITA_Bolzano.160200_IGDG.epw

ITA_Catania-Fontanarossa_IGDG.epw

ITA_Firenze-Peretola.161700_IGDG.epw

ITA_Napoli-Capodichino.162890_IGDG.epw

ITA_Roma-Fiumicino_IGDG.epw

ITA_Verona-Fillafranca160900_IGDG.epw

I dati di partenza per la creazione di tali file climatici provengono dalla raccolta italiana “Gianni di Giorgio”.

Sistemi

Le informazioni relative ai sistemi modellati per le simulazioni sono contenute in 90 file di base, nel formato *.idf*, che comprendono i dati relativi alle diverse configurazioni dei condotti ed ai diversi tipi di terreno. Ognuno di essi genera automaticamente altri 4 file con valori diversi per la grandezza parametrizzate, per un totale di 450 file. Questi presentano tutti uguale struttura e si differenziano esclusivamente per i parametri trattati nel capitolo 10. Pertanto, per ragioni di spazio, viene di seguito riportato solo uno dei file di base (il primo in ordine alfabetico), relativo alla località di Bolzano e sufficiente a ricostruire tutti gli altri (che avrebbero occupato circa 900 pagine).

```
!-Generator IDFEditor 1.38a
!-Option SortedOrder
```

```
!-NOTE: All comments with '!' are ignored by the IDFEditor and are generated automatically.
!- Use '!' comments if they need to be retained when using the IDFEditor.
```

```
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: VERSION =====
```

```
Version,
  6.0;          !- Version Identifier
```

```
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SIMULATIONCONTROL =====
```

```
SimulationControl,
  No,          !- Do Zone Sizing Calculation
  No,          !- Do System Sizing Calculation
  No,          !- Do Plant Sizing Calculation
  No,          !- Run Simulation for Sizing Periods
  Yes;         !- Run Simulation for Weather File Run Periods
```

```
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: BUILDING =====
```

```
Building,
  Edificio1,   !- Name
  0,           !- North Axis {deg}
  Suburbs,     !- Terrain
  0.04,        !- Loads Convergence Tolerance Value
  0.4,         !- Temperature Convergence Tolerance Value {deltaC}
  MinimalShadowing, !- Solar Distribution
  25;          !- Maximum Number of Warmup Days
```

```
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: TIMESTEP =====
```

```
Timestep,
  6;           !- Number of Timesteps per Hour
```

```
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: CONVERGENCELIMITS =====
```

```
ConvergenceLimits,
  1,           !- Minimum System Timestep {minutes}
  20;          !- Maximum HVAC Iterations
```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: RUNPERIOD =====

RunPeriod,
Periodo1, !- Name
10, !- Begin Month
1, !- Begin Day of Month
4, !- End Month
30, !- End Day of Month
UseWeatherFile, !- Day of Week for Start Day
Yes, !- Use Weather File Holidays and Special Days
Yes, !- Use Weather File Daylight Saving Period
No, !- Apply Weekend Holiday Rule
Yes, !- Use Weather File Rain Indicators
Yes, !- Use Weather File Snow Indicators
1; !- Number of Times Runperiod to be Repeated

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SCHEDULETYPELIMITS =====

ScheduleTypeLimits,
Limiti1, !- Name
, !- Lower Limit Value
, !- Upper Limit Value
Continuous; !- Numeric Type

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SCHEDULE:COMPACT =====

Schedule:Compact,
Funzionamento1, !- Name
Limiti1, !- Schedule Type Limits Name
Through: 12/31, !- Field 1
For: alldays, !- Field 2
Until: 24:00, !- Field 3
1; !- Field 4

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL =====

Material,
Materiale1, !- Name
VerySmooth, !- Roughness
0.1, !- Thickness {m}
0.1, !- Conductivity {W/m-K}
100, !- Density {kg/m3}
100; !- Specific Heat {J/kg-K}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: CONSTRUCTION =====

Construction,
Costruzione1, !- Name
Materiale1; !- Outside Layer

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: GLOBALGEOMETRYRULES =====

GlobalGeometryRules,
UpperLeftCorner, !- Starting Vertex Position
Counterclockwise, !- Vertex Entry Direction
Relative, !- Coordinate System

Relative, !- Daylighting Reference Point Coordinate System
Relative; !- Rectangular Surface Coordinate System

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONE =====

Zone,
 Scn_L10, !- Name
 , !- Direction of Relative North {deg}
 , !- X Origin {m}
 , !- Y Origin {m}
 , !- Z Origin {m}
 1, !- Type
 1, !- Multiplier
 autocalculate, !- Ceiling Height {m}
 =\$portata*3600*100, !- Volume {m3}
 , !- Zone Inside Convection Algorithm
 , !- Zone Outside Convection Algorithm
 Yes; !- Part of Total Floor Area

Zone,
 Scp_L10, !- Name
 , !- Direction of Relative North {deg}
 , !- X Origin {m}
 , !- Y Origin {m}
 , !- Z Origin {m}
 1, !- Type
 1, !- Multiplier
 autocalculate, !- Ceiling Height {m}
 =\$portata*3600*100, !- Volume {m3}
 , !- Zone Inside Convection Algorithm
 , !- Zone Outside Convection Algorithm
 Yes; !- Part of Total Floor Area

Zone,
 Sln_L10, !- Name
 , !- Direction of Relative North {deg}
 , !- X Origin {m}
 , !- Y Origin {m}
 , !- Z Origin {m}
 1, !- Type
 1, !- Multiplier
 autocalculate, !- Ceiling Height {m}
 =\$portata*3600*100, !- Volume {m3}
 , !- Zone Inside Convection Algorithm
 , !- Zone Outside Convection Algorithm
 Yes; !- Part of Total Floor Area

Zone,
 Slp_L10, !- Name
 , !- Direction of Relative North {deg}
 , !- X Origin {m}
 , !- Y Origin {m}
 , !- Z Origin {m}
 1, !- Type
 1, !- Multiplier
 autocalculate, !- Ceiling Height {m}
 =\$portata*3600*100, !- Volume {m3}
 , !- Zone Inside Convection Algorithm
 , !- Zone Outside Convection Algorithm
 Yes; !- Part of Total Floor Area

```

Zone,
  Scn_L40,          !- Name
  ,                !- Direction of Relative North {deg}
  ,                !- X Origin {m}
  ,                !- Y Origin {m}
  ,                !- Z Origin {m}
  1,               !- Type
  1,               !- Multiplier
  autocalculate,   !- Ceiling Height {m}
  =$portata*3600*100, !- Volume {m3}
  ,                !- Zone Inside Convection Algorithm
  ,                !- Zone Outside Convection Algorithm
  Yes;             !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Scp_L40,          !- Name
  ,                !- Direction of Relative North {deg}
  ,                !- X Origin {m}
  ,                !- Y Origin {m}
  ,                !- Z Origin {m}
  1,               !- Type
  1,               !- Multiplier
  autocalculate,   !- Ceiling Height {m}
  =$portata*3600*100, !- Volume {m3}
  ,                !- Zone Inside Convection Algorithm
  ,                !- Zone Outside Convection Algorithm
  Yes;             !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Sln_L40,          !- Name
  ,                !- Direction of Relative North {deg}
  ,                !- X Origin {m}
  ,                !- Y Origin {m}
  ,                !- Z Origin {m}
  1,               !- Type
  1,               !- Multiplier
  autocalculate,   !- Ceiling Height {m}
  =$portata*3600*100, !- Volume {m3}
  ,                !- Zone Inside Convection Algorithm
  ,                !- Zone Outside Convection Algorithm
  Yes;             !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Slp_L40,          !- Name
  ,                !- Direction of Relative North {deg}
  ,                !- X Origin {m}
  ,                !- Y Origin {m}
  ,                !- Z Origin {m}
  1,               !- Type
  1,               !- Multiplier
  autocalculate,   !- Ceiling Height {m}
  =$portata*3600*100, !- Volume {m3}
  ,                !- Zone Inside Convection Algorithm
  ,                !- Zone Outside Convection Algorithm
  Yes;             !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Scn_L70,          !- Name
  ,                !- Direction of Relative North {deg}
  ,                !- X Origin {m}
  ,                !- Y Origin {m}
  ,                !- Z Origin {m}

```

```

1,          !- Type
1,          !- Multiplier
autocalculate,    !- Ceiling Height {m}
=$portata*3600*100,    !- Volume {m3}
,            !- Zone Inside Convection Algorithm
,            !- Zone Outside Convection Algorithm
Yes;         !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Scp_L70,      !- Name
,              !- Direction of Relative North {deg}
,              !- X Origin {m}
,              !- Y Origin {m}
,              !- Z Origin {m}
1,            !- Type
1,            !- Multiplier
autocalculate,    !- Ceiling Height {m}
=$portata*3600*100,    !- Volume {m3}
,              !- Zone Inside Convection Algorithm
,              !- Zone Outside Convection Algorithm
Yes;         !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Sln_L70,      !- Name
,              !- Direction of Relative North {deg}
,              !- X Origin {m}
,              !- Y Origin {m}
,              !- Z Origin {m}
1,            !- Type
1,            !- Multiplier
autocalculate,    !- Ceiling Height {m}
=$portata*3600*100,    !- Volume {m3}
,              !- Zone Inside Convection Algorithm
,              !- Zone Outside Convection Algorithm
Yes;         !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Slp_L70,      !- Name
,              !- Direction of Relative North {deg}
,              !- X Origin {m}
,              !- Y Origin {m}
,              !- Z Origin {m}
1,            !- Type
1,            !- Multiplier
autocalculate,    !- Ceiling Height {m}
=$portata*3600*100,    !- Volume {m3}
,              !- Zone Inside Convection Algorithm
,              !- Zone Outside Convection Algorithm
Yes;         !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Scn_L100,     !- Name
,              !- Direction of Relative North {deg}
,              !- X Origin {m}
,              !- Y Origin {m}
,              !- Z Origin {m}
1,            !- Type
1,            !- Multiplier
autocalculate,    !- Ceiling Height {m}
=$portata*3600*100,    !- Volume {m3}
,              !- Zone Inside Convection Algorithm
,              !- Zone Outside Convection Algorithm

```

```

Yes;          !- Part of Total Floor Area

Zone,
  Scp_L100,    !- Name
  ,           !- Direction of Relative North {deg}
  ,           !- X Origin {m}
  ,           !- Y Origin {m}
  ,           !- Z Origin {m}
  1,         !- Type
  1,         !- Multiplier
  autocalculate, !- Ceiling Height {m}
  =$portata*3600*100, !- Volume {m3}
  ,         !- Zone Inside Convection Algorithm
  ,         !- Zone Outside Convection Algorithm
Yes;          !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Sln_L100,    !- Name
  ,           !- Direction of Relative North {deg}
  ,           !- X Origin {m}
  ,           !- Y Origin {m}
  ,           !- Z Origin {m}
  1,         !- Type
  1,         !- Multiplier
  autocalculate, !- Ceiling Height {m}
  =$portata*3600*100, !- Volume {m3}
  ,         !- Zone Inside Convection Algorithm
  ,         !- Zone Outside Convection Algorithm
Yes;          !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  Slp_L100,    !- Name
  ,           !- Direction of Relative North {deg}
  ,           !- X Origin {m}
  ,           !- Y Origin {m}
  ,           !- Z Origin {m}
  1,         !- Type
  1,         !- Multiplier
  autocalculate, !- Ceiling Height {m}
  =$portata*3600*100, !- Volume {m3}
  ,         !- Zone Inside Convection Algorithm
  ,         !- Zone Outside Convection Algorithm
Yes;          !- Part of Total Floor Area

```

```

Zone,
  ZonaInfiltrazioni, !- Name
  ,           !- Direction of Relative North {deg}
  ,           !- X Origin {m}
  ,           !- Y Origin {m}
  ,           !- Z Origin {m}
  1,         !- Type
  1,         !- Multiplier
  autocalculate, !- Ceiling Height {m}
  =$portata*3600*100, !- Volume {m3}
  ,         !- Zone Inside Convection Algorithm
  ,         !- Zone Outside Convection Algorithm
Yes;          !- Part of Total Floor Area

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WALL:ADIABATIC =====

Wall:Adiabatic,

MuroAdiabatico1, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Scn_L10, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico2, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Scp_L10, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico3, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Sln_L10, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico4, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Slp_L10, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico5, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Scn_L40, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico6, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name

Scp_L40, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico7, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Sln_L40, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico8, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Slp_L40, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico9, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Scn_L70, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico10, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Scp_L70, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,
MuroAdiabatico11, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Sln_L70, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}

90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,

MuroAdiabatico12, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Slp_L70, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,

MuroAdiabatico13, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Scn_L100, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,

MuroAdiabatico14, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Scp_L100, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,

MuroAdiabatico15, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Sln_L100, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}
0, !- Starting Y Coordinate {m}
0, !- Starting Z Coordinate {m}
1, !- Length {m}
1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,

MuroAdiabatico16, !- Name
Costruzione1, !- Construction Name
Slp_L100, !- Zone Name
0, !- Azimuth Angle {deg}
90, !- Tilt Angle {deg}
0, !- Starting X Coordinate {m}

0, !- Starting Y Coordinate {m}
 0, !- Starting Z Coordinate {m}
 1, !- Length {m}
 1; !- Height {m}

Wall:Adiabatic,

MuroAdiabatico0, !- Name
 Costruzione1, !- Construction Name
 ZonaInfiltrazioni, !- Zone Name
 0, !- Azimuth Angle {deg}
 90, !- Tilt Angle {deg}
 0, !- Starting X Coordinate {m}
 0, !- Starting Y Coordinate {m}
 0, !- Starting Z Coordinate {m}
 1, !- Length {m}
 1; !- Height {m}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONEINFILTRATION:DESIGNFLOWRATE =====

ZoneInfiltration:DesignFlowRate,

Infiltrazioni1, !- Name
 ZonaInfiltrazioni, !- Zone or ZoneList Name
 Funzionamento1, !- Schedule Name
 Flow/Zone, !- Design Flow Rate Calculation Method
 =\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
 , !- Flow per Zone Floor Area {m3/s-m2}
 , !- Flow per Exterior Surface Area {m3/s-m2}
 , !- Air Changes per Hour
 1, !- Constant Term Coefficient
 0, !- Temperature Term Coefficient
 0, !- Velocity Term Coefficient
 0; !- Velocity Squared Term Coefficient

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONEEARTHHTUBE =====

ZoneEarthtube,

Scn_L10, !- Zone Name
 Funzionamento1, !- Schedule Name
 =\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
 -100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
 100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
 0, !- Delta Temperature {deltaC}
 Natural, !- Earthtube Type
 , !- Fan Pressure Rise {Pa}
 1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 10, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
 HeavyAndSaturated, !- Soil Condition
 10.975, !- Average Soil Surface Temperature {C}
 8.27, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
 35, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
 1, !- Constant Term Flow Coefficient
 , !- Temperature Term Flow Coefficient
 , !- Velocity Term Flow Coefficient
 ; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Scp_L10, !- Zone Name
 Funzionamento1, !- Schedule Name
 =\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
 -100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
 100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
 0, !- Delta Temperature {deltaC}
 Natural, !- Earthtube Type
 , !- Fan Pressure Rise {Pa}
 1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 10, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
 HeavyAndSaturated, !- Soil Condition
 11.743, !- Average Soil Surface Temperature {C}
 7.78, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
 40, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
 1, !- Constant Term Flow Coefficient
 , !- Temperature Term Flow Coefficient
 , !- Velocity Term Flow Coefficient
 ; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Sln_L10, !- Zone Name
 Funzionamento1, !- Schedule Name
 =\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
 -100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
 100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
 0, !- Delta Temperature {deltaC}
 Natural, !- Earthtube Type
 , !- Fan Pressure Rise {Pa}
 1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 10, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
 LightAndDry, !- Soil Condition
 13.068, !- Average Soil Surface Temperature {C}
 7.43, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
 45, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
 1, !- Constant Term Flow Coefficient
 , !- Temperature Term Flow Coefficient
 , !- Velocity Term Flow Coefficient
 ; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Slp_L10, !- Zone Name
 Funzionamento1, !- Schedule Name
 =\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
 -100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
 100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
 0, !- Delta Temperature {deltaC}
 Natural, !- Earthtube Type
 , !- Fan Pressure Rise {Pa}
 1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 10, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}

LightAndDry, !- Soil Condition
13.541, !- Average Soil Surface Temperature {C}
7.223, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
49, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
1, !- Constant Term Flow Coefficient
, !- Temperature Term Flow Coefficient
, !- Velocity Term Flow Coefficient
; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Scn_L40, !- Zone Name
Funzionamento1, !- Schedule Name
=\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
-100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
0, !- Delta Temperature {deltaC}
Natural, !- Earthtube Type
, !- Fan Pressure Rise {Pa}
1, !- Fan Total Efficiency
0.1, !- Pipe Radius {m}
0.015, !- Pipe Thickness {m}
40, !- Pipe Length {m}
0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
HeavyAndSaturated, !- Soil Condition
10.975, !- Average Soil Surface Temperature {C}
8.27, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
35, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
1, !- Constant Term Flow Coefficient
, !- Temperature Term Flow Coefficient
, !- Velocity Term Flow Coefficient
; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Scp_L40, !- Zone Name
Funzionamento1, !- Schedule Name
=\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
-100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
0, !- Delta Temperature {deltaC}
Natural, !- Earthtube Type
, !- Fan Pressure Rise {Pa}
1, !- Fan Total Efficiency
0.1, !- Pipe Radius {m}
0.015, !- Pipe Thickness {m}
40, !- Pipe Length {m}
0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
HeavyAndSaturated, !- Soil Condition
11.743, !- Average Soil Surface Temperature {C}
7.78, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
40, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
1, !- Constant Term Flow Coefficient
, !- Temperature Term Flow Coefficient
, !- Velocity Term Flow Coefficient
; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Sln_L40, !- Zone Name
Funzionamento1, !- Schedule Name
=\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
-100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}

100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
 0, !- Delta Temperature {deltaC}
 Natural, !- Earthtube Type
 , !- Fan Pressure Rise {Pa}
 1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 40, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
 LightAndDry, !- Soil Condition
 13.068, !- Average Soil Surface Temperature {C}
 7.43, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
 45, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
 1, !- Constant Term Flow Coefficient
 , !- Temperature Term Flow Coefficient
 , !- Velocity Term Flow Coefficient
 ; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Slp_L40, !- Zone Name
 Funzionamento1, !- Schedule Name
 =\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
 -100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
 100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
 0, !- Delta Temperature {deltaC}
 Natural, !- Earthtube Type
 , !- Fan Pressure Rise {Pa}
 1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 40, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
 LightAndDry, !- Soil Condition
 13.541, !- Average Soil Surface Temperature {C}
 7.223, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
 49, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
 1, !- Constant Term Flow Coefficient
 , !- Temperature Term Flow Coefficient
 , !- Velocity Term Flow Coefficient
 ; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Scn_L70, !- Zone Name
 Funzionamento1, !- Schedule Name
 =\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
 -100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
 100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
 0, !- Delta Temperature {deltaC}
 Natural, !- Earthtube Type
 , !- Fan Pressure Rise {Pa}
 1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 70, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
 HeavyAndSaturated, !- Soil Condition
 10.975, !- Average Soil Surface Temperature {C}
 8.27, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
 35, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}

1, !- Constant Term Flow Coefficient
, !- Temperature Term Flow Coefficient
, !- Velocity Term Flow Coefficient
; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Scp_L70, !- Zone Name
Funzionamento1, !- Schedule Name
=\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
-100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
0, !- Delta Temperature {deltaC}
Natural, !- Earthtube Type
, !- Fan Pressure Rise {Pa}
1, !- Fan Total Efficiency
0.1, !- Pipe Radius {m}
0.015, !- Pipe Thickness {m}
70, !- Pipe Length {m}
0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
HeavyAndSaturated, !- Soil Condition
11.743, !- Average Soil Surface Temperature {C}
7.78, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
40, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
1, !- Constant Term Flow Coefficient
, !- Temperature Term Flow Coefficient
, !- Velocity Term Flow Coefficient
; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Sln_L70, !- Zone Name
Funzionamento1, !- Schedule Name
=\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
-100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
0, !- Delta Temperature {deltaC}
Natural, !- Earthtube Type
, !- Fan Pressure Rise {Pa}
1, !- Fan Total Efficiency
0.1, !- Pipe Radius {m}
0.015, !- Pipe Thickness {m}
70, !- Pipe Length {m}
0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
LightAndDry, !- Soil Condition
13.068, !- Average Soil Surface Temperature {C}
7.43, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
45, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
1, !- Constant Term Flow Coefficient
, !- Temperature Term Flow Coefficient
, !- Velocity Term Flow Coefficient
; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Slp_L70, !- Zone Name
Funzionamento1, !- Schedule Name
=\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
-100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
0, !- Delta Temperature {deltaC}
Natural, !- Earthtube Type
, !- Fan Pressure Rise {Pa}

1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 70, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
 LightAndDry, !- Soil Condition
 13.541, !- Average Soil Surface Temperature {C}
 7.223, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
 49, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
 1, !- Constant Term Flow Coefficient
 , !- Temperature Term Flow Coefficient
 , !- Velocity Term Flow Coefficient
 ; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Scn_L100, !- Zone Name
 Funzionamento1, !- Schedule Name
 =\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
 -100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
 100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
 0, !- Delta Temperature {deltaC}
 Natural, !- Earthtube Type
 , !- Fan Pressure Rise {Pa}
 1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 100, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
 HeavyAndSaturated, !- Soil Condition
 10.975, !- Average Soil Surface Temperature {C}
 8.27, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
 35, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
 1, !- Constant Term Flow Coefficient
 , !- Temperature Term Flow Coefficient
 , !- Velocity Term Flow Coefficient
 ; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

ZoneEarthtube,

Scp_L100, !- Zone Name
 Funzionamento1, !- Schedule Name
 =\$portata, !- Design Flow Rate {m3/s}
 -100, !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
 100, !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
 0, !- Delta Temperature {deltaC}
 Natural, !- Earthtube Type
 , !- Fan Pressure Rise {Pa}
 1, !- Fan Total Efficiency
 0.1, !- Pipe Radius {m}
 0.015, !- Pipe Thickness {m}
 100, !- Pipe Length {m}
 0.3, !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
 2, !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
 HeavyAndSaturated, !- Soil Condition
 11.743, !- Average Soil Surface Temperature {C}
 7.78, !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
 40, !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
 1, !- Constant Term Flow Coefficient
 , !- Temperature Term Flow Coefficient
 , !- Velocity Term Flow Coefficient
 ; !- Velocity Squared Term Flow Coefficient


```

ZoneEarthtube,
  Sln_L100,          !- Zone Name
  Funzionamento1,  !- Schedule Name
  =$portata,        !- Design Flow Rate {m3/s}
  -100,             !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
  100,              !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
  0,                !- Delta Temperature {deltaC}
  Natural,          !- Earthtube Type
  ,                !- Fan Pressure Rise {Pa}
  1,                !- Fan Total Efficiency
  0.1,              !- Pipe Radius {m}
  0.015,           !- Pipe Thickness {m}
  100,              !- Pipe Length {m}
  0.3,              !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
  2,                !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
  LightAndDry,     !- Soil Condition
  13.068,           !- Average Soil Surface Temperature {C}
  7.43,             !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
  45,               !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
  1,                !- Constant Term Flow Coefficient
  ,                !- Temperature Term Flow Coefficient
  ,                !- Velocity Term Flow Coefficient
  ;                !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

```

```

ZoneEarthtube,
  Slp_L100,          !- Zone Name
  Funzionamento1,  !- Schedule Name
  =$portata,        !- Design Flow Rate {m3/s}
  -100,             !- Minimum Zone Temperature when Cooling {C}
  100,              !- Maximum Zone Temperature when Heating {C}
  0,                !- Delta Temperature {deltaC}
  Natural,          !- Earthtube Type
  ,                !- Fan Pressure Rise {Pa}
  1,                !- Fan Total Efficiency
  0.1,              !- Pipe Radius {m}
  0.015,           !- Pipe Thickness {m}
  100,              !- Pipe Length {m}
  0.3,              !- Pipe Thermal Conductivity {W/m-K}
  2,                !- Pipe Depth Under Ground Surface {m}
  LightAndDry,     !- Soil Condition
  13.541,           !- Average Soil Surface Temperature {C}
  7.223,            !- Amplitude of Soil Surface Temperature {C}
  49,               !- Phase Constant of Soil Surface Temperature {days}
  1,                !- Constant Term Flow Coefficient
  ,                !- Temperature Term Flow Coefficient
  ,                !- Velocity Term Flow Coefficient
  ;                !- Velocity Squared Term Flow Coefficient

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: HVACTEMPLATE:THERMOSTAT =====

```

HVACTemplate:Thermostat,
  Termostato1,      !- Name
  ,                 !- Heating Setpoint Schedule Name
  20,               !- Constant Heating Setpoint {C}
  ,                 !- Cooling Setpoint Schedule Name
  26;               !- Constant Cooling Setpoint {C}

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: HVACTEMPLATE:ZONE:IDEALLOADSAIRSYSTEM =====

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Scn_L10, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Scp_L10, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Sln_L10, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Slp_L10, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Scn_L40, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Scp_L40, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Sln_L40, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Slp_L40, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Scn_L70, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Scp_L70, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Sln_L70, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Slp_L70, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Scn_L100, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Scp_L100, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
Sln_L100, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,

Slp_L100, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem,
ZonaInfiltrazioni, !- Zone Name
Termostato1; !- Template Thermostat Name

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: PARAMETRIC:SETVALUEFORRUN =====

Parametric:SetValueForRun,
\$portata, !- Parameter Name
0.02778, !- Value for run 1
0.11111, !- Value for run 2
0.19444, !- Value for run 3
0.27778; !- Value for run 4

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: PARAMETRIC:RUNCONTROL =====

Parametric:RunControl,
ControlloParametri, !- Name
Yes, !- Perform run 1
Yes, !- Perform run 2
Yes, !- Perform run 3
Yes; !- Perform run 4

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: PARAMETRIC:FILENAME_SUFFIX =====

Parametric:FileNameSuffix,
SuffissoPortate, !- name
P100, !- Suffix for file name in run 1
P400, !- Suffix for file name in run 2
P700, !- Suffix for file name in run 3
P1000; !- Suffix for file name in run 4

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLEDICTIONARY =====

Output:VariableDictionary,
regular, !- Key Field
Name; !- Sort Option

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:TABLE:SUMMARYREPORTS =====

Output:Table:SummaryReports,
AllSummary; !- Report 1 Name

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:TABLE:MONTHLY =====

Output:Table:Monthly,
CarichiSensibili Condotti, !- Name
1, !- Digits After Decimal
Outdoor Dry Bulb, !- Variable or Meter 1 Name
SumOrAverage, !- Aggregation Type for Variable or Meter 1
EarthTube-Sensible Heat Loss, !- Variable or Meter 2 Name
SumOrAverage, !- Aggregation Type for Variable or Meter 2
Zone Infiltration Sensible Heat Loss, !- Variable or Meter 3 Name
SumOrAverage, !- Aggregation Type for Variable or Meter 3

EarthTube-Sensible Heat Gain, !- Variable or Meter 4 Name
SumOrAverage, !- Aggregation Type for Variable or Meter 4
Zone Infiltration Sensible Heat Gain, !- Variable or Meter 5 Name
SumOrAverage; !- Aggregation Type for Variable or Meter 5

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUTCONTROL:TABLE:STYLE =====

OutputControl:Table:Style,
HTML, !- Column Separator
JtoKWH; !- Unit Conversion

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLE =====

Output:Variable,
*, !- Key Value
Outdoor Dry Bulb, !- Variable Name
Monthly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
*, !- Key Value
Earth Tube Ground Interface Temperature, !- Variable Name
Monthly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
*, !- Key Value
Earth Tube Outdoor Air Heat Transfer Rate, !- Variable Name
Monthly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
*, !- Key Value
Earth Tube Zone Inlet Air Temperature, !- Variable Name
Monthly; !- Reporting Frequency

Output:Variable,
*, !- Key Value
Earth Tube Air Volume Flow Rate, !- Variable Name
Monthly; !- Reporting Frequency

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:DIAGNOSTICS =====

Output:Diagnostics,
DisplayAllWarnings, !- Key 1
DisplayExtraWarnings; !- Key 2

Bibliografia

La simulazione dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici

LIBRI

- Clarke J.A., Energy simulation in building design, Butterworth Heinemann, Oxford, 2001
- Malkawi A.M., Augenbroe G. (a cura di), Advanced building simulation, Spon Press, London, 2004

ARTICOLI SCIENTIFICI

- Bleil de Souza C., Knight I., Thermal performance simulation from an architectural point of view, 10h International IBPSA Conference, Beijing, China, Sept 3-6, 2007
- Hensen J.L.M., Towards more effective use of building performance simulation in design, in van Leeuwen J., in Timmermans H. (a cura di), "Developments in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning", Eindhoven University of Technology, 2004
- Kusuda T., Early history and future prospects of building system simulation, in Proceedings of Building Simulation 2001, Rio de Janeiro, August 2001
- Lian Y., Hao Y., Dynamic simulation and analysis of factors impacting the energy consumption of residential buildings, in "Heating technologies for efficiency", Vol.III, Shenzhen, 2006
- Purdy J., Beausoleil-Morrison I., The significant factors in modelling residential buildings, parts 1 and 2, in Proceedings of Building Simulation 2001, Rio de Janeiro, August 2001
- Reiser C. et al., DIN 18599, accounting for primary energy new code requires dynamic simulation, Third National Conference of IBPSA-USA, Berkeley, California, July 30 - August 1, 2008
- Strachan, P.A., Simulation support for performance assessment of building components, in Building and Environment, vol. 43, n.2, Feb. 2008
- Tronchini L., Fabbri K., Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation, Energy and buildings, vol. 40, n. 7, 2008
- White T., Dec M., Troy D., Effective early collaboration between engineers and architects for successful energy-efficient design, Third National Conference of IBPSA-USA, Berkeley, California, July 30 - August 1, 2008
- Woloszyn M., Rode C., Tools for Performance Simulation of Heat, Air and Moisture Conditions of Whole Buildings, Building Simulation, vol. 1, n.1, Marzo 2008
- Xia C., Zhu Y., Lin B., Building Simulation as Assistance in the Conceptual Design, Building Simulation, Vol.1, n.2, 2008

- Yezioroa A., Dongb B., Leite F., An applied artificial intelligence approach towards assessing building performance simulation tools, in "Energy and Buildings", Vol. 40, n. 4, 2008
- Zhai Z., Application of Computational Fluid Dynamics in building design: Aspects and Trends, Indoor and built environment, vol.15, n.4, 2006

LETTERATURA TECNICA

- Crawley D.B., Hand J.W., Kummert M., Griffith B.T., Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, Technical report, in "Building and Environment", Vol.43, n.4, April 2008
- California Energy Commision, Residential Compliance Manual for California's 2005 Energy Efficiency Standards, C.E.C., 2005
- Documentazione tecnica di EnergyPlus
- Documentazione tecnica di eQuest
- Documentazione tecnica di ESP-r
- Documentazione tecnica di TRNSYS
- Jacobs P., Henderson H., State-of-the-art review whole building, building envelope and HVAC component and system simulation and design tools, Technical report for the Architectural Energy Corporation, Boulder, CO (US); CDH Energy Corp., Cazenovia, NY (US), 2002

FONTI INTERNET

- International Building Performance Simulation Association: <http://www.ibpsa.org/>
- Lawrence Berkeley National Laboratories: <http://www.lbl.gov/>
- National Renewable Energy Laboratory: <http://www.nrel.gov/>
- Simupedia: <http://www.ibpsa-germany.org/index.php/Simupedia/en>
- Strathclyde University: <http://www.strath.ac.uk/>
- U.S. Department of Energy: <http://www.energy.gov/>

I sistemi passivi in architettura

- Grosso M., *Il raffrescamento passivo degli edifici in zone a clima temperato*, Maggioli, Rimini, 2008
- Benedetti C., *Manuale di architettura bioclimatica*, Maggioli, Rimini, 1994

- Calderaro V., *Architettura solare passiva*, Kappa, Roma, 1981
- Dessì V., *Progettare il comfort urbano*, Sistemi Editoriali, Napoli 2007
- Dubois M.C., *A method to define shading devices considering ideal solar energy transmittance*, Proceedings of the Third ISES Europe Solar Congress: Eurosun 2000
- Fantini A., Platone C., *Sistemi impiantistici nell'architettura*, Kappa, Roma 1999
- Iannone F., *Modelli e software per il calcolo automatico della ventilazione naturale*, Wip, Bari, 2001
- Mathur Jyotirmay, Anupma, Mathur Sanjay, *Experimental investigation on four different types of solar chimney*, Advances in energy research, 2006
- Mazria E., *Sistemi solari passivi*, Muzio, Padova 1980
- Orlandi F., Marrocco M., *Qualità del comfort ambientale*, Dedalo, Bari, 2000
- Santamouris M. et al., *Advances in passive cooling*, Earthscan, Londra 2007
- Schibuola L., Cecchinato L., *Sistemi solari attivi e passivi*, Esculapio, Bologna, 2005
- Zappone C., *La serra solare*, Sistemi Editoriali, Napoli, 2005

Riferimenti legislativi e normativi

DIRETTIVE EUROPEE

- DIRETTIVA 2002/91/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia
- DIRETTIVA 2006/32/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 5 aprile 2006 concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio
- DIRETTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)

LEGGI ITALIANE

- LEGGE 9 gennaio 1991, n. 10
Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia

- DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 26 agosto 1993, n. 412
Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione
- DECRETO LEGISLATIVO 19 agosto 2005, n. 192
Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia
- DECRETO LEGISLATIVO 29 dicembre 2006, n. 311:
"Disposizioni correttive ed integrative al Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia"
- DECRETO LEGISLATIVO 30 maggio 2008, n. 115
Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE.
- LEGGE 6 agosto 2008, n. 133:
"Conversione in legge, con modificazioni, del Decreto Legge 25 giugno 2008, n. 112, recante disposizioni urgenti per lo sviluppo economico, la semplificazione, la competitività, la stabilizzazione della finanza pubblica e la perequazione tributaria"
- DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 2 aprile 2009 , n. 59
Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia.
- DECRETO 26 giugno 2009 DEL MINISTRO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.
- DECRETO LEGISLATIVO 29 marzo 2010, n.56
"Modifiche ed integrazioni al decreto 30 maggio 2008, n. 115, recante attuazione della direttiva 2006/32/CE, concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante Abrogazioni della direttiva 93/76/CEE"

NORME TECNICHE

- UNI EN ISO 13790:2008

Prestazione energetica degli edifici

Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento

- UNI EN 15265:2008

Prestazione energetica degli edifici

Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti mediante metodi dinamici - Criteri generali e procedimenti di validazione

- UNI TS 11300-1

Prestazioni energetiche degli edifici

Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale

- UNI TS 11300-2

Prestazioni energetiche degli edifici

Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria

- UNI TS 11300-3

Prestazioni energetiche degli edifici

Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva