



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

C.I.T.E.R.A.

Centro Interdipartimentale Territorio, Edilizia,  
Restauro, Architettura

DOTTORATO DI RICERCA

in

**“Risparmio energetico e microgenerazione distribuita”**

XXIV CICLO

Coordinatore: Prof. Ing. Livio De Santoli

**MODELLO PER LA VALUTAZIONE ENERGETICA DI GRANDI  
PATRIMONI EDILIZI**

Dottorando:

Ing. Marco Cecconi

Tutor:

Prof. Ing. Francesco Mancini

Alla mia famiglia e a chi mi è stato vicino

# Indice

<b>INTRODUZIONE, OBIETTIVI E METODI .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPITOLO 1: NORMATIVA E METODI DI CALCOLO .....</b>	<b>9</b>
1.1 <i>La politica energetica europea ed italiana .....</i>	10
1.2 <i>Metodi di calcolo .....</i>	21
<b>CAPITOLO 2: MODELLI MATEMATICI DEL SOFTWARE.....</b>	<b>24</b>
2.1 <i>Bilancio energetico invernale .....</i>	25
2.2 <i>Bilancio energetico estivo.....</i>	38
2.3 <i>Scambio termico per trasmissione invernale.....</i>	47
2.4 <i>Scambio termico per trasmissione estivo.....</i>	58
2.5 <i>Coefficienti di scambio termico per trasmissione.....</i>	67
2.6 <i>Scambio termico per ventilazione invernale .....</i>	75
2.7 <i>Scambio termico per ventilazione estivo.....</i>	81
2.8 <i>Coefficienti di scambio termico per ventilazione.....</i>	87
2.9 <i>Apporti interni .....</i>	93
2.10 <i>Apporti solari .....</i>	95
2.11 <i>Modello di calcolo specifico per serre e sottotetti.....</i>	97
2.12 <i>Fabbisogno di acqua calda sanitaria .....</i>	107
2.13 <i>Modellazione degli impianti .....</i>	109
<b>CAPITOLO 3: GUIDA AL FUNZIONAMENTO DEL SOFTWARE.....</b>	<b>110</b>
3.1 <i>Presentazione .....</i>	111
3.2 <i>Obiettivo.....</i>	112
3.3 <i>Struttura del software .....</i>	114
3.4 <i>Impostazione del lavoro .....</i>	121
3.5 <i>Definizione delle tecnologie dell'involucro .....</i>	122
3.6 <i>Definizione delle tecnologie impiantistiche.....</i>	133
3.7 <i>Modellazione della zona di calcolo nella configurazione baseline.....</i>	138
3.8 <i>Modellazione della zona di calcolo nelle configurazioni alternative.....</i>	172
<b>CAPITOLO 4: VALIDAZIONE DEL MODELLO SU PICCOLA SCALA.....</b>	<b>174</b>
4.1 <i>Obiettivo.....</i>	175
4.2 <i>Benchmark 1: Studio di caso CTI - Edificio 1E.....</i>	176

---

<b>CAPITOLO 5: APPLICAZIONE SU GRANDE SCALA ALLA CITTA' DI ROMA .....</b>	<b>188</b>
5.1 <i>Introduzione .....</i>	<i>189</i>
5.2 <i>Obiettivo.....</i>	<i>190</i>
5.3 <i>Fabbisogno energetico del patrimonio edilizio esistente .....</i>	<i>191</i>
5.4 <i>Studio degli interventi di riqualificazione energetica .....</i>	<i>215</i>
5.5 <i>Studio degli scenari di evoluzione .....</i>	<i>229</i>
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>239</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>243</b>

## **Introduzione, obiettivi e metodi**

## **Introduzione, obiettivi e metodi**

In questi anni assistiamo ad un progressivo accrescimento dell'interesse verso l'efficienza energetica. Questa esigenza nasce come chiave di volta di molteplici problematiche: da un lato quelle economiche legate all'aumento del prezzo degli idrocarburi, dall'altro quelle sociali derivanti da una maggiore "responsabilità ambientale". E' ormai chiaro che il rapporto uomo-natura portato avanti fino ad ora, basato sullo sfruttamento indiscriminato delle risorse, non è più sostenibile, ed il degrado ambientale in cui siamo costretti a vivere ne è una prova continua.

Al momento attuale uno dei nodi di maggior interesse è edilizia, responsabile del 40% dei consumi europei<sup>1</sup> e non interessata da uno sviluppo tecnologico particolarmente intenso se paragonato ad altri ambiti. Da trent'anni a questa parte dispositivi tecnologici sempre più avveniristici sono diventati parte integrante vita dell'uomo occidentale, al contrario solo recentemente nell'edilizia si stanno diffondendo materiali ed impianti innovativi in grado di produrre consistenti miglioramenti delle prestazioni energetiche. A riguardo in questi ultimi quindici anni vi è stato un forte impulso legislativo comunitario verso due obiettivi paralleli e complementari: l'efficienza energetica e la produzione di energia da fonti rinnovabili.

Sulle nuove costruzioni le normative energetiche sono ormai stringenti. Al contrario sul "costruito" non vi sono obblighi particolari, se non in caso di ristrutturazione o sostituzione di impianti. Le ragioni di tale differenziazione vanno trovate sicuramente nella grande complessità legata a tali interventi, dove problematiche di natura tecnica si intersecano a difficoltà gestionali ed economiche di ogni tipo legate alle specificità di ogni edificio.

---

<sup>1</sup> Fonte: Direttiva 2010/31/UE

D'altro canto il rispetto degli impegni nazionali e locali per la riduzione delle emissioni di gas serra non può prescindere da un intervento sugli edifici antecedenti all'attuale legislazione energetica, poiché essi sono responsabili di gran parte delle emissioni.

E' fuori dubbio che in questo ambito non è possibile un'imposizione dall'alto degli interventi, ma essi devono scaturire da un incontro delle necessità dei proprietari con quelle delle amministrazioni locali e nazionali. Lo Stato e gli enti locali, obbligati a rispettare determinati livelli di emissioni di CO<sub>2</sub>, dovrebbero quindi attuare una pianificazione strategica delle regole e degli incentivi al fine di indurre i proprietari a intervenire a favore dell'efficienza energetica.

Tutto ciò si traduce, in primo luogo, in una serie di valutazioni numeriche:

- dal punto di vista delle amministrazioni pubbliche è necessario valutare le prestazioni globali di grandi patrimoni edilizi e di fornire informazioni circa gli interventi più convenienti da promuovere per ridurre le emissioni del settore, nonché l'entità complessiva degli investimenti;
- dal punto di vista dei privati e dei loro tecnici è utile conoscere quali siano i "punti deboli" energetici del proprio sistema edificio per definire esattamente gli interventi valutandone la convenienza tecnico/economica.

Quanto affermato è possibile solo mediante l'utilizzo di strumenti di calcolo che sappiano adattarsi a tali molteplici aspetti dello stesso problema. Attualmente sono rari gli esempi di software commerciali in grado di adattarsi a questo tipo di necessità. Questi sono spesso orientati alla mera certificazione energetica e quindi non si adattano bene a studi di tipo comparativo e valutazioni di costi/benefici negli anni. Inoltre molti dei programmi risultano troppo dettagliati dal punto di vista della definizione degli involucri, il cui inserimento comporta molto lavoro e non permette

analisi preliminari veloci per avere in breve tempo un'idea delle strategie di intervento migliori.

Inoltre nella maggior parte dei casi non è possibile valutare soluzioni innovative sia legate agli impianti (esempio: cogenerazione, trigenerazione, solar-cooling, sistemi ad assorbimento, ecc) che all'involucro edilizio (esempio: serre solari, schermi solari complessi, pareti ventilate, ecc). Come ultima considerazione, affatto secondaria, si tratta spesso di prodotti commerciali "chiusi", i cui calcoli esatti sono noti solo ai programmatori che li hanno implementati e non possono essere modificati o ampliati a proprio piacimento in funzione delle singole necessità. Lo spirito di questa tesi è, invece, di creare una piattaforma *open-source* sull'esempio di ciò che è stato realizzato dal *Lawrence Berkeley National Laboratory* dell'Università della California, dove lo stesso *Department of Energy* degli Stati Uniti ha finanziato lo sviluppo di *Energy Plus*: un software libero al quale ogni ricercatore del mondo può fornire il suo contributo ampliandone le funzionalità.

L'obiettivo principale della tesi è quindi di realizzare un software di analisi energetica degli edifici che abbia le seguenti caratteristiche:

- Analisi energetico/economica del sistema edificio-impianto per tutti gli utilizzi energetici: riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, utenze elettriche, utenze gas.
- Calcolo differenziato che incorpora due differenti algoritmi a seconda delle necessità:
  - quello standard descritto dalle norme UNI TS 11300, al fine di eseguire valutazioni ripetibili in base ai parametri contenuti nella norma ed eseguire la classificazione energetica degli edifici;
  - quello alternativo, costruito in questo lavoro di ricerca, in grado di seguire in modo più accurato gli effettivi utilizzi del sistema edificio-



impianto anche in presenza di utilizzi discontinui e soluzioni tecniche particolari.

- Classificazione energetica in base alle normative vigenti.
- Flessibilità e scalabilità del campo di applicazione: appartamenti, edifici, gruppi di edifici o intere città con qualsiasi destinazione d'uso (residenziale e non residenziale) sia di nuova costruzione che già esistenti.
- Riguardo alla valutazione energetica di grandi patrimoni edilizi: integrazione di algoritmi evolutivi in grado di studiare l'andamento globale delle emissioni di CO2 negli anni in base alle politiche di sostegno alla riqualificazione energetica adottate. Tale funzionalità è utile per pianificare il raggiungimento degli obiettivi di riduzione dei gas serra su scala locale o nazionale. Lo studio sulle città è già stato applicato con successo al caso di Roma con una versione embrionale del software [De Santoli, Mancini, Cecconi 2009-2011] ed è estendibile ad altre città.
- Analisi comparativa semplice ed efficace sulle possibili soluzioni di intervento sull'involucro edilizio e sugli impianti con valutazioni dei costi, dei benefici e dei ritorni economici.
- Inserimento dati rapido e semplice per ridurre i tempi degli screening preliminari.
- Possibilità di valutare soluzioni innovative del sistema architettonico-impiantistico: serre solari, schermi solari complessi, pareti ventilate, ventilazione naturale, cogenerazione, trigenerazione, solar-cooling, fotovoltaico, solare termico, eolico, biomasse, biogas, idrogeno, illuminazione ad alta efficienza, ecc.
- Filosofia open-source degli algoritmi di calcolo (su piattaforma Excel - VisualBasic) e possibilità di personalizzazione delle funzionalità. Software

completamente trasparente in cui ogni operazione viene spiegata e commentata in modo da rappresentare anche uno strumento didattico al servizio degli studenti.

L'obiettivo secondario, in ordine di tempo ma non di importanza, è di applicare il software ad una situazione reale: la riqualificazione energetica dell'edilizia residenziale della città di Roma. Alla luce dell'adesione di Roma al Patto dei Sindaci e dei conseguenti impegni assunti nella riduzione della propria emissione dei gas serra, Roma è stata chiamata a redigere un Piano d'Azione Energetico contenente le strategie da attuare per raggiungere tale obiettivo. Grazie al software è stato possibile prevedere l'evoluzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> sia secondo l'attuale tendenza, sia in relazione a scenari alternativi caratterizzati da strategie d'azione più o meno incisive. I calcoli hanno permesso di determinare l'entità e la combinazione ottimale di interventi in grado di centrare gli obiettivi prefissati col minor utilizzo di risorse economiche. Tali indicazioni sono state effettivamente introdotte nel recente piano d'azione energetico di Roma (*Sustainable Energy Action Plan - SEAP*) approvato dalla Giunta Comunale il 19/10/2011.

# **Capitolo 1**

## **Normativa e metodi di calcolo**

## 1.1 La politica energetica europea ed italiana

### 1.1.1 Evoluzione storica

Il primo provvedimento che testimonia un interessamento politico al problema ambientale risale a 46 anni fa, e precisamente al 1966 quando venne promulgata la Legge 615 : *“Provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico”*, che si preoccupò di stabilire i primi vincoli in materia di inquinamento, relativi ai grossi impianti di riscaldamento e ai processi industriali. Sulla stessa scia, sospinta anche dalla crisi energetica del 1973, venne promulgata nel 1976 la famosa Legge 373: *“Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici”* che sanciva una serie di obblighi di progettazione, realizzazione e manutenzione orientati ad un utilizzo più razionale delle fonti energetiche. Il mondo scoprì per la prima volta che il petrolio, su cui si basava ogni aspetto dell'economia, era una fonte energetica dalla disponibilità limitata e sottoposta alle vessazioni di un ristretto cartello produttivo.

La Legge 373 rimase il punto di riferimento per circa due decenni, in cui il problema energetico venne momentaneamente accantonato, fino all'arrivo della Legge 10 che ne sancì l'abrogazione. Restano invece in vigore ancora oggi una parte dei decreti attuativi che seguirono la Legge 373, in particolare il DM del 10 Marzo 1977 *“Determinazione delle zone climatiche”*, ed il DPR 1052 del 28 Giugno 1977 *“Regolamento di esecuzione alla legge 30 Aprile 1976, n.373, relativa al consumo energetico per usi termici negli edifici”*.

### 1.1.2 **La Legge 10 del 1991 ed i conseguenti decreti attuativi**

Il panorama normativo attuale inizia a prefigurarsi sostanzialmente nei primi anni '90, con la promulgazione della Legge 10 del 9 Gennaio 1991: *“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”* che si occupa in maniera globale del problema energetico nazionale ponendo sullo stesso livello lo sfruttamento efficiente delle risorse energetiche tradizionali e la produzione da fonti rinnovabili.

I principali contenuti della Legge 10 riguardano:

- La concessione di incentivi in conto capitale per interventi di efficientamento energetico e di sviluppo delle energie rinnovabili.
- L'introduzione della figura dell'Energy Manager per i settori ad alto fabbisogno energetico.
- La promozione del teleriscaldamento.
- La semplificazione delle procedure per eseguire lavori di ammodernamento degli impianti.
- L'introduzione del concetto di “Certificazione energetica”.

Gli aspetti più tecnici legati all'efficienza energetica degli edifici ed al “Piano energetico nazionale” vengono rimandati ad una serie di decreti attuativi. Di fondamentale importanza è il DPR 412 del 26 Agosto 1993: *“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 dell'art. 4, comma 4, della Legge 9 gennaio 1991, n. 10.”*.

Quest'ultimo in particolare:

- Definisce le zone climatiche.

- Introduce la classificazione degli edifici per destinazione d'uso.
- Definisce le massime temperature ambiente durante il periodo invernale.
- Impone dei requisiti minimi di rendimento per i generatori di calore, criteri di efficienza per l'impianto termico e l'utilizzo di contabilizzazione del calore.
- Introduce l'indice FEN (Fabbisogno Energetico Normalizzato) per valutare il fabbisogno energetico di climatizzazione invernale di un edificio e ne fissa un limite massimo.
- Impone limiti massimi all'orario di accensione giornaliera ed annuale degli impianti termici.
- Definisce gli obblighi relativi alla manutenzione degli impianti termici.

### 1.1.3 La Direttiva Europea 2002/91/CE



## EPBD

Nel contesto di un rafforzamento delle politiche comunitarie rispetto a quelle nazionali, il 16 Dicembre 2002 venne promulgata la Direttiva europea 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia, chiamata spesso anche EPBD (“Energy Performance of Buildings Directive”). Quest’ultima ha costituito il cardine della politica energetica nazionale in ambito edilizio fino al 1° febbraio 2012, quando è stata sostituita dalla Direttiva 2010/31/UE. L’obiettivo della Direttiva era di *promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici nella Comunità, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni per quanto riguarda il clima degli ambienti interni e l'efficacia sotto il profilo dei costi.*<sup>(1)</sup>

---

<sup>1</sup> Direttiva 2002/91/CE, art.1

In essa viene rilevato che *l'aumento del rendimento energetico occupa un posto di rilievo nel complesso delle misure e degli interventi necessari per conformarsi al protocollo di Kyoto* <sup>(2)</sup> e che *la gestione del fabbisogno energetico è un importante strumento che consente alla Comunità di influenzare il mercato mondiale dell'energia e quindi la sicurezza degli approvvigionamenti nel medio e lungo termine.*<sup>(3)</sup> *L'energia impiegata nel settore residenziale e terziario, composto per la maggior parte di edifici, rappresenta oltre il 40 % del consumo finale di energia della Comunità. Essendo questo un settore in espansione, i suoi consumi di energia e quindi le sue emissioni di biossido di carbonio sono destinati ad aumentare.*<sup>(4)</sup> *Si avverte dunque (...) l'esigenza di uno strumento giuridico (...) che sancisca interventi più concreti al fine di realizzare il grande potenziale di risparmio energetico tuttora inattuato e di ridurre l'ampio divario tra le risultanze dei diversi Stati membri in questo settore.*<sup>(5)</sup>

Nel perseguire tali obiettivi la Direttiva 2002/91/CE promuove la creazione di una metodologia di calcolo *che consideri, oltre alla coibentazione, una serie di altri fattori che svolgono un ruolo di crescente importanza, come il tipo di impianto di riscaldamento e condizionamento, l'impiego di fonti di energia rinnovabili e le caratteristiche architettoniche dell'edificio* <sup>(6)</sup>, in modo da attuare i provvedimenti più efficaci per ogni situazione. In particolare, nei paesi del sud dell'Europa, dove *si osserva una crescente proliferazione degli impianti di condizionamento dell'aria* <sup>(7)</sup>, ***dovrebbe essere accordata priorità alle strategie che contribuiscono a migliorare il rendimento termico degli edifici nel periodo estivo.*** *Concretamente, occorrerebbe sviluppare maggiormente le*

---

<sup>2</sup> Direttiva 2002/91/CE, introduzione, comma 3

<sup>3</sup> Direttiva 2002/91/CE, introduzione, comma 4

<sup>4</sup> Direttiva 2002/91/CE, introduzione, comma 6

<sup>5</sup> Direttiva 2002/91/CE, introduzione, comma 7

<sup>6</sup> Direttiva 2002/91/CE, introduzione, comma 10

<sup>7</sup> Direttiva 2002/91/CE, introduzione, comma 18

*tecniche di raffrescamento passivo, soprattutto quelle che contribuiscono a migliorare le condizioni climatiche interne e il microclima intorno agli edifici.*<sup>(8)</sup>

La Direttiva prevede di esprimere l'efficienza energetica di un edificio attraverso un **attestato di certificazione energetica** che definisca la reale situazione dell'edificio in termini di rendimento energetico e permetta ai consumatori di effettuare valutazioni e raffronti. Per "*rendimento energetico*" s'intende *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. Tale quantità viene espressa da uno o più descrittori calcolati tenendo conto della coibentazione, delle caratteristiche tecniche e di installazione, della progettazione e della posizione in relazione agli aspetti climatici, dell'esposizione al sole e dell'influenza delle strutture adiacenti, dell'esistenza di sistemi di generazione propria di energia e degli altri fattori, compreso il clima degli ambienti interni, che influenzano il fabbisogno energetico.*<sup>(9)</sup>

Sulla base di queste premesse è stato elaborato il *Mandato 343* che ha incaricato un gruppo di comitati tecnici del CEN ( *Comité Européen de Normalisation* ) di redigere una serie di norme tecniche in grado di chiarificare gli intenti della Direttiva, in modo da facilitarne il recepimento a livello nazionale e l'applicazione pratica. Lo schema che viene seguito è quello in figura 1.1.1.

---

<sup>8</sup>Direttiva 2002/91/CE, introduzione, comma 18

<sup>9</sup> Direttiva 2002/91/CE, art.2 comma 2



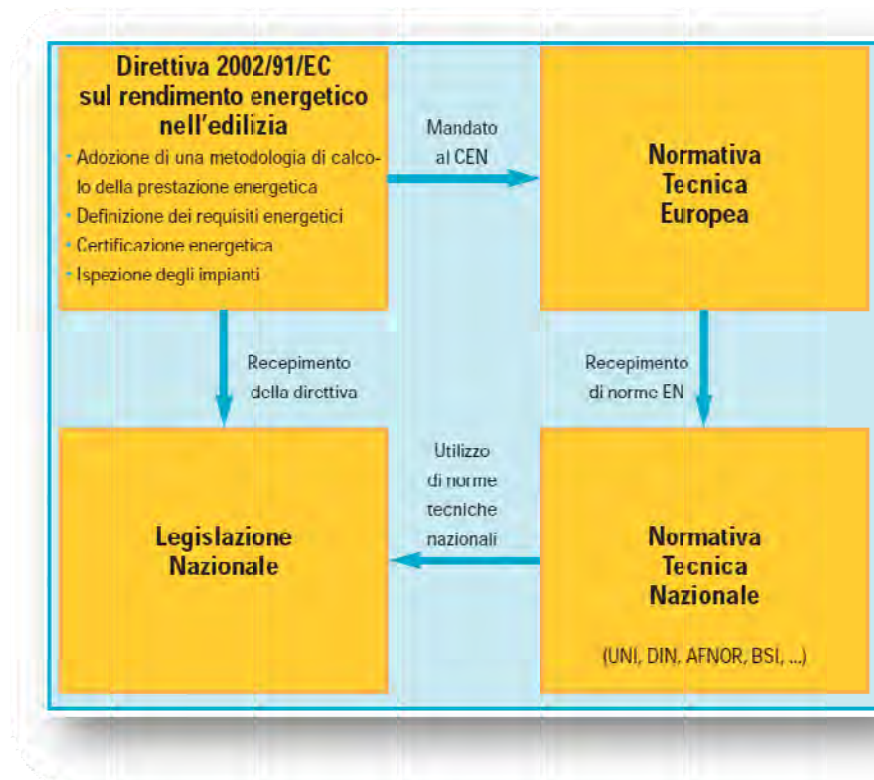


Figura 1.1.1. Flusso normativo europeo e nazionale legato alla EPBD

I Comitati Tecnici interessati dal Mandato 343 sono i seguenti:

- **CEN/TC 89** - Prestazioni termiche degli edifici e dei componenti per l'edilizia
- **CEN/TC 156** - Impianti di ventilazione per edifici
- **CEN/TC 228** - Impianti di riscaldamento negli edifici
- **CEN/TC 247** - Regolazioni per le installazioni meccaniche negli edifici
- **CEN/BT/TF 173** - Energy Performance of Buildings Project Group

#### 1.1.4 **Il Decreto legislativo 192 del 19 Agosto 2005 (e successive modifiche e integrazioni)**

Il Dlgs 192 costituisce l'attuazione della direttiva 2002/91/CE ed in particolare *stabilisce i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico.*<sup>(10)</sup>

Il Dlgs 192 ha subito negli anni una lunga serie di modifiche e integrazioni dai seguenti provvedimenti:

- D.Lgs. 29 Dicembre 2006 n.311;
- Legge 24 dicembre 2007 n.244;
- Legge 24 dicembre 2007 n.244;
- Legge 6 Agosto 2008 n.133;
- DPR 2 aprile 2009 n.59;
- DM 26 giugno 2009;
- D.Lgs. 29 marzo 2010 n.56;
- DL 3 marzo 2011 n.28

Grazie al presente decreto si sono per la prima volta fissati limiti prestazionali non solo sugli impianti di riscaldamento, ma sull'intero sistema edificio/impianto, mediante il calcolo dei coefficienti di prestazione EP. Inoltre si sono introdotti limiti prestazionali minimi anche sui singoli elementi (pareti, solai, infissi, generatori di calore) in caso di ristrutturazioni parziali o mera sostituzione degli stessi.

In relazione al calcolo degli EP, è stato introdotto il concetto di **certificazione energetica**, promosso dalla Direttiva 2002/91/CE, che ha permesso di legare la

---

<sup>10</sup> Dlgs 192/05, art.1, comma 1

prestazione energetica dell'edificio ad una classe di merito (A, B, C, D, E, F, G), così come avviene per alcuni elettrodomestici. Tale certificazione risulta obbligatoria per ogni edificio in caso di nuova costruzione, ristrutturazione, vendita o riqualificazione energetica.

#### 1.1.5 **Il DPR 59 del 2 Aprile 2009**

Questo è il primo dei due decreti attuativi previsti dal DLgs 192/2005, arrivati a promulgazione ben 4 anni in ritardo rispetto a quanto previsto. L'ambito del decreto è la definizione dei criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva, per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari e, limitatamente al terziario, per l'illuminazione artificiale. In sostanza tale provvedimento impone che le metodologie di calcolo da adottare per ciò che concerne il calcolo degli indici di prestazione energetica sono contenute nelle quattro norme tecniche: la UNI/TS 11300 Parte 1, 2, 3, 4. Indica inoltre che, ai fini della certificazione energetica degli edifici, le metodologie di calcolo sono riportate nelle "Linee guida nazionali" di cui al DM 26 Giugno 2010. Inoltre il decreto ribadisce che le prestazioni energetiche degli edifici vengano espresse mediante gli indici EP. Vengono fissati valori massimi per la trasmittanza termica delle strutture, valori minimi per il rendimento degli impianti termici, viene ribadita l'obbligatorietà di sistemi di termoregolazione e dei sistemi schermanti per le facciate esposte al sole. Per finire vengono promosse le energie rinnovabili con l'obbligo del soddisfacimento del 50% del fabbisogno di calore per l'acqua calda sanitaria da solare termico, ed il teleriscaldamento, con l'obbligo di predisporre l'impianto in modo che sia possibile un eventuale allaccio.

### **1.1.6 Il DM 26 Giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica**

Si tratta del secondo decreto attuativo previsto dal DLgs 192/2005. Questo provvedimento fissa esattamente le finalità, le modalità di calcolo e classificazione nonché di presentazione dei risultati dell'analisi energetica. Introduce l'indicatore EPgl (indice di prestazione energetica globale dell'edificio) come somma di EPI (prestazione invernale), EPacs (produzione acqua calda), Epe (prestazione estiva) e EPill (illuminazione). Il calcolo invernale è obbligatorio e può essere svolto secondo le diverse metodologie proposte, tra cui quelle semplificate per edifici con superficie inferiore a 1000mq. Il calcolo estivo invece, in assenza di una normativa tecnica consolidata, è facoltativo. Per questi motivi attualmente nel calcolo del indice di prestazione globale non vengono prese in considerazione le prestazioni estive e quelle del sistema di illuminazione:  $EPgl = EPI + EPacs$ . Nel sistema di classificazione viene fissato come limite ammissibile per le nuove costruzioni il valore dell'indice EPI in vigore a partire dal 1 gennaio 2010. Le diverse classi sono poi generate come multipli e sottomultipli di tale livello. Per edifici inferiori a 1000mq è possibile un'autocertificazione del proprietario che attesti che l'edificio è in classe G. Grazie a questo decreto la certificazione energetica diventa ufficialmente obbligatoria su tutto il territorio nazionale.

	“Metodo di calcolo di progetto” (paragrafo 5.1)	“Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio” (paragrafo 5.2 punto 1)	“Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio” (paragrafo 5.2 punto 2)	“Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio” (paragrafo 5.2 punto 3)
Edifici interessati	Tutte le tipologie di edifici nuovi ed esistenti	Tutte le tipologie di edifici esistenti	Edifici residenziali esistenti con superficie utile inferiore o uguale a 3000 m <sup>2</sup>	Edifici residenziali esistenti con superficie utile inferiore o uguale a 1000 m <sup>2</sup>
Prestazione invernale involucro edilizio	Norme UNI/TS 11300	Norme UNI/TS 11300	DOCET (CNR-ENEA)	Metodo semplificato (Allegato 2)
Energia primaria prestazione invernale	Norme UNI/TS 11300	Norme UNI/TS 11300	DOCET (CNR-ENEA)	Metodo semplificato (Allegato 2)
Energia primaria prestazione acqua calda sanitaria	Norme UNI/TS 11300	Norme UNI/TS 11300	DOCET (CNR-ENEA)	Norme UNI/TS 11300 (esistenti)
Prestazione estiva involucro edilizio	Norme UNI/TS 11300	Norme UNI/TS 11300	DOCET (CNR-ENEA)	Norme UNI/TS 11300 o DOCET o metodologia paragrafo 6.2 (*)

Fig. 1.1.2. Riepilogo delle metodologie di calcolo per l'indice di prestazione energetica.

### 1.1.7 La Direttiva Europea 2010/31/UE

Si tratta di un aggiornamento della Direttiva 2002/91/CE. Rispetto a quest'ultima precisa maggiormente gli obiettivi in fatto di definizione delle metodologie per il calcolo delle prestazioni energetiche e dei limiti ammissibili. Introduce inoltre il concetto di “edifici ad energia quasi zero” e impone che tutti i nuovi edifici a partire dal 31/12/2010 abbiano tali caratteristiche. Si lascia però agli Stati membri la definizione esatta di edificio ad energia quasi zero. Vengono rafforzate le misure di incentivazione economica per la ristrutturazione energetica e viene ribadita l'obbligatorietà della certificazione energetica degli edifici. Viene inoltre disposta l'ispezione degli impianti di riscaldamento superiori a 20kW e di condizionamento superiori a 12kW.

In conclusione, l'attuale panorama normativo può dirsi ad oggi quasi completo sul fronte dell'efficienza energetica. Recentemente sono state pubblicate anche le ultime due norme tecniche UNI/TS 11300 parte 3 e parte 4 che permetterebbero un'analisi energetica completa degli edifici. In realtà il parametro EPgl richiesto dalla legge non contempla ancora le prestazioni degli impianti di raffrescamento e di illuminazione. Si attendono quindi gli ultimi sviluppi di un processo normativo che, partendo dalla Legge 10/91, ha impiegato circa 20 anni per arrivare ad una sua completa realizzazione.

A questo punto sono i cittadini stessi a ricoprire il ruolo fondamentale di attribuire importanza alle prestazioni energetiche di un edificio, operando una reale discriminazione dell'offerta edilizia in base a tali parametri.

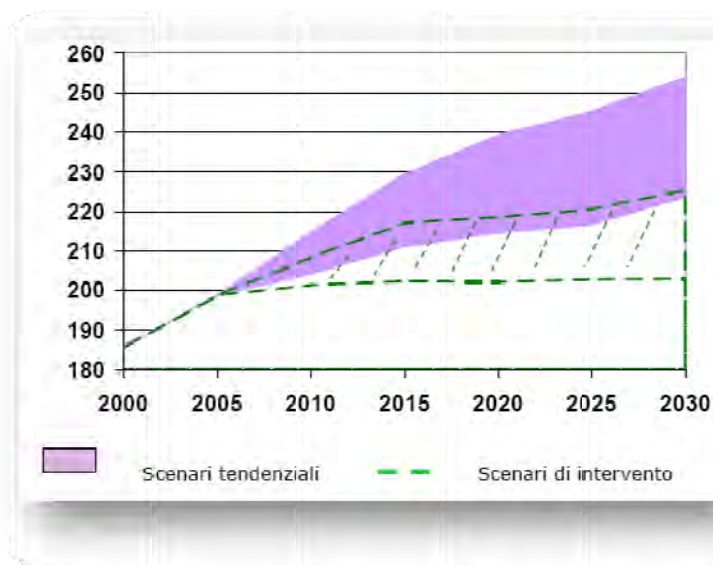


Fig. 1.1.3. Consumi di energia primaria negli scenari tendenziali o in caso d'intervento [Mtep].  
(Fonte: ENEA, Rapporto Energia-Ambiente 2006)

## 1.2 Metodi di calcolo

Per ciò che concerne il calcolo dei fabbisogni energetici degli edifici dovuti al riscaldamento esistono in letteratura svariati metodi di calcolo con caratteristiche e complessità assai diverse. Si propone qui una breve disamina dei principali metodi in ordine crescente di complessità ed accuratezza.

### 1.2.1 Metodo stagionale (dei Gradi-Giorno)

Si tratta del metodo più semplificato e si basa su un orizzonte temporale pari all'intera stagione di riscaldamento. Il fabbisogno termico viene espresso semplicemente come:

$$Q = 24 \frac{H_{gl} GG}{\eta} \quad [1.2-1]$$

dove:

$Q$  = Fabbisogno energetico stagionale per riscaldamento [Wh].

$H_{gl}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione e ventilazione  $\left[ \frac{W}{K} \right]$

$\eta$  = Rendimento medio stagionale dell'impianto termico.

$GG$  = Gradi-giorno, definiti come la somma delle differenze di temperatura positive tra la temperatura di set-point interna e quella esterna durante l'intera stagione di riscaldamento:

$$GG = \sum_{g=1}^n (\theta_i - \theta_e)$$

Il numero 24 sta ad indicare le ore giornaliere, poiché i gradi giorno si riferiscono ai giorni e non alle ore.

Il metodo dei gradi-giorno può essere migliorato prendendo in considerazione anche gli apporti gratuiti, che vanno a ridurre il fabbisogno termico risultante. Occorre però

introdurre anche un coefficiente di utilizzazione di tali apporti poiché non tutti potranno condurre ad un effettivo risparmio energetico, mentre gli altri potrebbero essere semplicemente dissipati all'esterno oppure potrebbero indurre sovratemperature interne.

### 1.2.2 **Metodo mensile**

Si tratta del metodo attualmente più utilizzato per il calcolo dei fabbisogni energetici. Su di esso si basano le attuali norme tecniche UNI TS 11300 ed è dunque il riferimento per ciò che concerne la certificazione energetica degli edifici.

Il metodo mensile è concettualmente simile al metodo dei gradi-giorno, con la differenza che il periodo di calcolo viene suddiviso nei diversi mesi che lo compongono. In questo modo è possibile ottenere un'accuratezza di calcolo molto maggiore.

Su di esso si basa anche il software Archi-Energy sviluppato in questo lavoro di ricerca, perciò si rimanda ai prossimi capitoli per una spiegazione dettagliata.

### 1.2.3 **Metodo orario e sub-orario (dinamico)**

I metodi dinamici modificano radicalmente l'approccio di calcolo rispetto a quelli stagionali o mensili. Esistono svariati metodi di soluzione, basati su differenti algoritmi. Se ne elencano alcuni:

- Risoluzione diretta delle equazioni differenziali: risoluzione numerica delle equazioni differenziali che descrivono la dinamica del calore.
- Risoluzione mediante reti equivalenti: utilizzo di reti termiche equivalenti modellate con componenti elettrici e risolte allo stesso modo delle reti elettriche, mediante trasformazioni matematiche (Z o Laplace).



- Fattori di risposta: calcolo delle risposte impulsive del sistema edificio ed utilizzo delle stesse per lo studio dinamico del sistema.
- Funzioni di trasferimento: calcolo delle funzioni di trasferimento degli elementi edilizi nel dominio Z o di Laplace.
- Reti neurali: modellazione del sistema sfruttando le reti neurali.
- Analisi modale: descrizione dell'edificio con equazioni differenziali diagonalizzate utilizzando i nodi.

I metodi dinamici sono chiaramente i più accurati ma richiedono un livello tale di computazione da rendere indispensabile l'utilizzo di un calcolatore elettronico. Va comunque sottolineato che questi metodi hanno spesso un grado di precisione che è superiore alle incertezze con le quali è possibile modellare un edificio. Ne consegue che il loro utilizzo ha senso esclusivamente nel caso in cui sia necessaria un'accuratezza molto elevata e in cui si conoscano alla perfezione tutte le caratteristiche dell'edificio.

## **Capitolo 2**

# **Modelli matematici del software**

## 2.1 Bilancio energetico invernale

Si procede a descrivere gli algoritmi di calcolo del bilancio termico invernale con le due metodologie implementate nel software: quella conforme alla normativa vigente e quella alternativa sperimentata dal presente lavoro di ricerca.

### 2.1.1 Bilancio energetico invernale con metodo normativo

L'impostazione della norma UNI TS 11300-1 prevede la stesura di un bilancio energetico mensile tra i diversi scambi termici che interessano l'edificio: trasmissione, ventilazione, apporti interni e apporti solari. Il bilancio viene differenziato per la stagione invernale e per quella estiva.

Nella **stagione invernale** esso assume la forma seguente:

$$Q_{H,cont,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} Q_{H,gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} (Q_{int} + Q_{sol}) \quad [2.1-1]$$

dove:

$Q_{H,cont,nd}$  = Fabbisogno energetico per riscaldamento continuo.

$Q_{H,ht}$  = Scambio termico totale per trasmissione e ventilazione.

$Q_{H,gn}$  = Apporti termici totali (interni e solari).

$Q_{H,tr}$  = Scambio termico totale per trasmissione nel caso di riscaldamento.

$Q_{H,ve}$  = Scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento.

$Q_{H,int}$  = Apporti termici interni.

$Q_{H,sol}$  = Apporti termici solari.

$\eta_{H,gn}$  = Fattore di utilizzazione degli apporti termici.

Rispetto alla formulazione normativa è stato introdotto il pedice “<sub>cont</sub>” per indicare che si tratta di un riscaldamento continuo e per differenziarlo dal riscaldamento discontinuo di cui si parlerà successivamente.

Nel bilancio si considerano integralmente le dispersioni per trasmissione e ventilazione, mentre gli apporti vengono limitati mediante il “fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti” che esprime il loro effettivo utilizzo in funzione della quantità di apporti rispetto alle dispersioni ed in funzione dell’inerzia termica dell’edificio. Più il rapporto apporti/dispersioni è alto, minore è il loro utilizzo, più l’inerzia termica dell’edificio è elevata, maggiore è il loro utilizzo.

Il fattore di utilizzazione degli apporti, a sua volta, assume la forma seguente:

$$\eta_{H,gn} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H + 1}} & \xrightarrow{se} \gamma_H > 0 \neq 1 \\ \frac{a_H}{a_H + 1} & \xrightarrow{se} \gamma_H = 1 \\ \frac{1}{\gamma_H} & \xrightarrow{se} \gamma_H < 0 \end{cases} \quad [2.1-2]$$

dove:

$$\gamma_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}} \quad [2.1-3]$$

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \quad [2.1-4]$$

e dove:

$\eta_{H,gn}$  = Fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti nella stagione di riscaldamento.

$\gamma_H$  = Rapporto tra apporti gratuiti e dispersioni per trasmissione e ventilazione.

$a_H$  = Fattore di inerzia termica.

$a_{H,0}$  = Fattore di inerzia termica di riferimento, fissato dalla norma pari a 1.

$\tau_{H,0}$  = Costante di tempo di riferimento, fissata dalla norma a 15h.

$$\tau = \frac{C_m}{H_{ve,adj} + H_{tr,adj}} \quad [2.1-5]$$

= Costante di tempo della zona termica, funzione della capacità termica e dei coefficienti globali di scambio termico per trasmissione e ventilazione.

In sostanza viene effettuato un unico bilancio termico mensile, esteso a tutti i giorni della stagione invernale, per 24 ore al giorno, comprendente al suo interno le dispersioni per trasmissione e ventilazione a temperatura media e una parte degli apporti gratuiti.

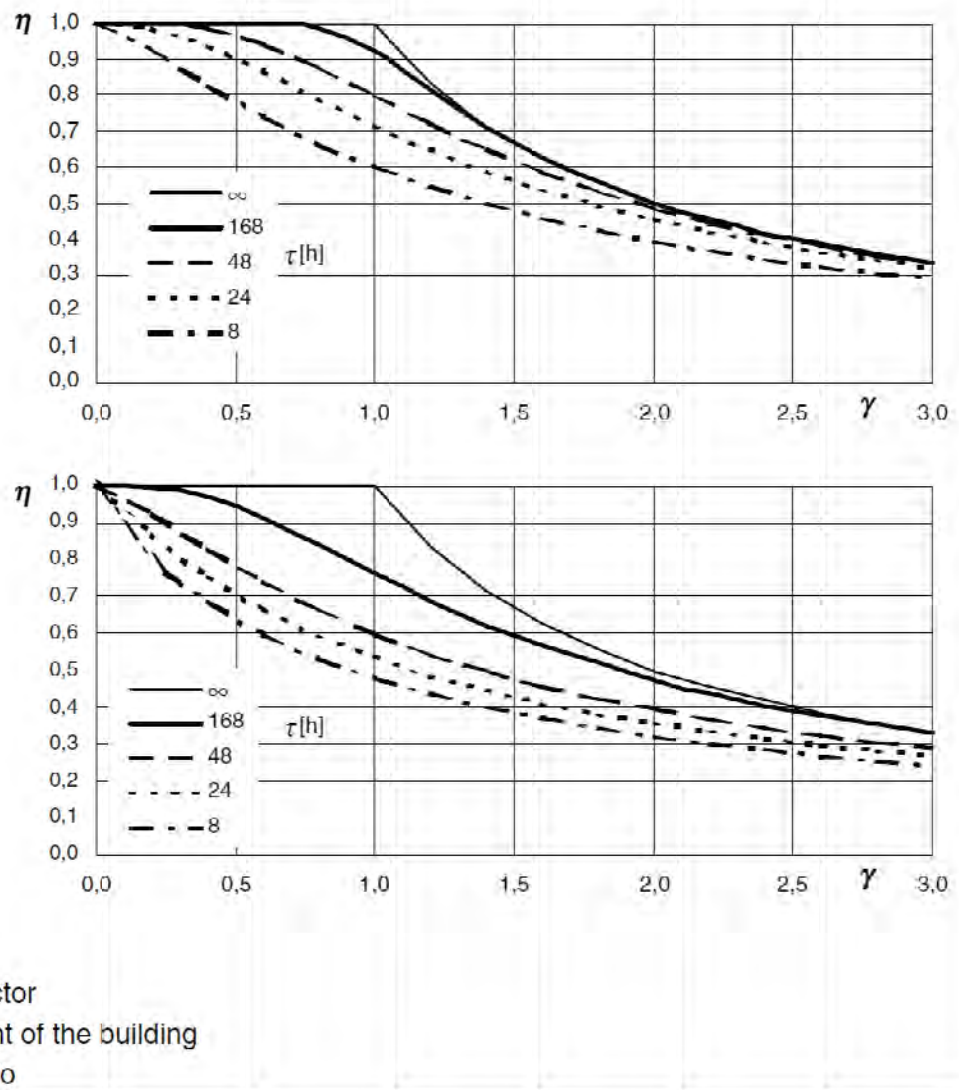


Fig. 2.1.1. Fattore di utilizzo degli apporti gratuiti in funzione della costante di tempo dell'edificio e del rapporto guadagni/dispersioni, per riscaldamento continuo (in alto) e per riscaldamento nelle sole ore diurne (in basso).

### 2.1.2 **Bilancio energetico invernale con metodo alternativo**

L'elaborazione di un metodo alternativo scaturisce principalmente da due limitazioni della norma UNI TS 11300:

- l'impossibilità di valutare in modo adeguato un utilizzo intermittente dell'impianto di riscaldamento;
- l'ipotesi che la temperatura esterna sia sempre costante e pari alla temperatura media nell'arco delle 24 ore.

Il primo limite, introdotto chiaramente per uniformare i calcoli sulla certificazione energetica, risulta invece assai pesante al fine di un'accurata valutazione energetica degli edifici reali. L'esercizio degli impianti è infatti molto spesso ridotto a poche ore al giorno e non per tutti i giorni della settimana, ne consegue che i calcoli normativi conducono ad una sovrastima dei fabbisogni energetici che può superare il 50%.

Il secondo limite non costituisce un grande errore nel caso di riscaldamento h24, ma diventa importante nel caso in cui si consideri un utilizzo intermittente. Se, per esempio, la struttura è utilizzata e riscaldata solo nelle ore diurne, gli scambi termici avvengono ad un  $\Delta\theta$  ridotto rispetto a quello medio giornaliero, soprattutto per ciò che concerne la ventilazione dove non sono presenti forti inerzie termiche. Per contro, durante la notte, gli scambi avvengono ad un  $\Delta\theta$  maggiore rispetto alla media ma, non essendo attivo l'impianto di riscaldamento, anche la temperatura interna scende e l'energia persa tende a ridursi progressivamente. Naturalmente ciò comporta un raffreddamento notturno maggiore e quindi la necessità di maggiore energia al mattino per riportare la temperatura interna al set-point impostato. In ogni caso il consumo sarà inferiore rispetto ad un riscaldamento continuo.

Ciò significa che il calcolo normativo tende a sovrastimare il carico termico. Questo è un approccio corretto per ciò che concerne la certificazione energetica, ma migliorabile per un'analisi più accurata delle situazioni reali.

Per ovviare a tali limitazioni il modello alternativo qui presentato prevede la definizione di due tipi di discontinuità nell'esercizio degli impianti:

1. Interruzioni brevi giornaliere: quelle che si verificano all'interno delle giornate in cui la struttura è funzionante e si protraggono solo per poche ore tra un'accensione dell'impianto ed un'altra (per es. le interruzioni notturne).
2. Interruzioni lunghe: quelle che si verificano per intere giornate in cui la struttura non è in funzione (per es. weekend, chiusura estiva, ecc).

Ne consegue che il calcolo è strutturato su tre diversi periodi:

**1. Giorni di funzionamento struttura:**

- a. Periodi di attività: Ore in cui la struttura è pienamente funzionante e l'impianto di riscaldamento è quindi esercito al set-point di comfort. Tale periodo è definito nelle formule col pedice "1" ed il set-point è "set1".
- b. Periodi di non attività: Ore in cui la struttura non è funzionante e l'impianto di riscaldamento è quindi spento o esercito a set-point ridotto. Tale periodo è definito nelle formule col pedice "2,f" ed il set-point è "set2".

**2. Giorni di non funzionamento struttura:**

Tutte le 24 ore dei giorni in cui la struttura non è funzionante e gli impianti sono quindi spenti o eserciti al medesimo set-point ridotto del periodo 1.b. Tale periodo è definito nelle formule col pedice "2,nf" ed il set-point è "set2".



Per una migliore comprensione della divisione temporale, fondamentale per comprendere il funzionamento del software, si riportano in fig. 2.1.2 e 2.1.3 alcuni esempi.

	LUN	MAR	MER	GIO	VEN	SAB	DOM	FESTIVI
00-01								
01-02								
02-03								
03-04								
05-06								
06-07								
07-08								
08-09								
09-10								
10-11								
11-12								
12-13								
13-14								
14-15								
15-16								
16-17								
17-18								
18-19								
19-20								
20-21								
21-22								
22-23								
23-24								

Fig. 2.1.2. Esempio di suddivisione dei periodi temporali per un tipico edificio residenziale.

	LUN	MAR	MER	GIO	VEN	SAB	DOM	FESTIVI
00-01								
01-02								
02-03								
03-04								
05-06								
06-07								
07-08								
08-09								
09-10								
10-11								
11-12								
12-13								
13-14								
14-15								
15-16								
16-17								
17-18								
18-19								
19-20								
20-21								
21-22								
22-23								
23-24								

Fig. 2.1.3. Esempio di suddivisione dei periodi temporali per un tipico edificio del terziario.

Questa suddivisione comporta quindi sia un diverso esercizio degli impianti, che una diversa valutazione delle temperature di scambio termico. Infatti vengono definite tre temperature esterne, relative ai tre periodi sopra menzionati, calcolate come la media, sui relativi periodi, della temperatura esterna oraria del luogo. Perciò gli scambi termici di ogni periodo avvengono alla temperatura relativa a quel periodo. Più avanti verrà spiegato nel dettaglio il sistema di calcolo.

Da quanto detto l'equazione generale di bilancio termico assume la seguente forma alternativa alla [2.1-1]:

$$Q_{H,disc,nd} = Q_{H,nd,f} + Q_{H,nd,nf} \quad [2.1-6]$$

dove:

$$Q_{H,nd,f} = (Q_{H,ht1} + Q_{H,ht2,f} + Q_{H,ht,restart}) + \eta_{H,gn,f} (Q_{int,f} + Q_{sol,f}) \quad [2.1-7]$$

$$Q_{H,nd,nf} = Q_{H,ht2,nf} + \eta_{H,gn,nf} (Q_{int,nf} + Q_{sol,nf}) \quad [2.1-8]$$

dove:

$Q_{H,disc,nd}$  = Fabbisogno energetico per riscaldamento discontinuo mensile.

$Q_{H,nd,f}$  = Fabbisogno energetico per riscaldamento mensile dei giorni di funzionamento struttura (es. giorni lavorativi).

$Q_{H,nd,nf}$  = Fabbisogno energetico per riscaldamento mensile dei giorni di non funzionamento struttura (es. weekend, chiusura o assenza) quindi a set-point ridotto.

$Q_{H,ht1}$  = Scambio termico totale per trasmissione e ventilazione durante le ore di attività =  $Q_{H,tr,set1} + Q_{H,ve,set1}$

$Q_{H,ht2,f}$  = Scambio termico totale per trasmissione e ventilazione durante le ore di non attività dei giorni di funzionamento (es. interruzione notturna) =  $Q_{H,tr,set2,f} + Q_{H,ve,set2,f}$

$Q_{H,ht2,nf}$  = Scambio termico totale per trasmissione e ventilazione durante le 24 ore dei giorni di non funzionamento (es. weekend) =  $Q_{H,tr,set2,nf} + Q_{H,ve,set2,nf}$

$Q_{H,ht,restart}$  = Fabbisogno energetico necessario a riportare la temperatura interna a quella di set-point 1 alla fine dei periodi di interruzione.

$Q_{H,int,f}$  = Apporti termici interni durante le 24 ore dei giorni di funzionamento.

$Q_{H,int,nf}$  = Apporto termici interni durante le 24 ore dei giorni di non funzionamento.

$Q_{H,sol,f}$  = Apporti termici solari durante le 24 ore dei giorni di funzionamento.

$Q_{H,sol,nf}$  = Apporti termici solari durante le 24 ore dei giorni di non funzionamento.

$\eta_{H,gn,f}$  = Fattore di utilizzazione degli apporti termici nei giorni di funzionamento.

$\eta_{H,gn,nf}$  = Fattore di utilizzazione degli apporti termici nei giorni di non funzionamento.

Il bilancio termico è stato spezzato in due contributi poiché i giorni di attività e quelli di non attività costituiscono nel modello due periodi indipendenti, con caratteristiche termiche e di esercizio assai diverse.

Nei bilancio dei giorni di funzionamento [2.1-7] vengono prese in considerazione le dispersioni complessive di periodo 1 (ore di attività), quelle di periodo 2 (ore di non attività) e quelle di *restart* per riportare la temperatura interna al punto di set-point 1. Gli apporti totali vengono sempre ridotti tramite il fattore di utilizzazione.

Il fattore di utilizzazione nei giorni di funzionamento assume la forma seguente:

$$\eta_{H,gn,f} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma_{H,f}^{a_{H,f}}}{1 - \gamma_{H,f}^{a_{H,f} + 1}} & \xrightarrow{se} \gamma_{H,f} > 0 \neq 1 \\ \frac{a_{H,f}}{a_{H,f} + 1} & \xrightarrow{se} \gamma_{H,f} = 1 \\ \frac{1}{\gamma_{H,f}} & \xrightarrow{se} \gamma_{H,f} < 0 \end{cases} \quad [2.1-9]$$

dove:

$$\gamma_{H,f} = \frac{Q_{H,gn,f}}{Q_{H,ht1}} \quad [2.1-10]$$

$$a_{H,f} = a_{H,0} + \frac{\tau_f}{\tau_{H,0}} \quad [2.1-11]$$

e dove:

$\eta_{H,gn,f}$  = Fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti nella stagione di riscaldamento, nei giorni di funzionamento.

$\gamma_{H,f}$  = Rapporto tra tutti gli apporti gratuiti nelle 24 ore e le sole dispersioni per trasmissione e ventilazione durante le ore di attività, nei giorni di funzionamento.

$a_{H,f}$  = Fattore di inerzia termica, nei giorni di funzionamento.

$a_{H,0}$  = Fattore di inerzia termica di riferimento, fissato dalla norma pari a 1.

$\tau_{H,0}$  = Costante di tempo di riferimento, fissata dalla norma a 15h.

$$\tau = \frac{C_m}{H_{ve,adj,f} + H_{tr,adj}} \quad [2.1-12]$$

= Costante di tempo della zona termica, funzione della capacità termica e dei coefficienti globali di scambio termico per trasmissione e ventilazione, nei giorni di funzionamento.

Nel calcolo del fattore di utilizzazione nei giorni di funzionamento è importante sottolineare che vengono presi in considerazione gli interi apporti (diurni e notturni), ma solamente le dispersioni che avvengono nel periodo di attività (set-point 1). Vengono quindi estromesse quelle nel periodo "2f" (notturne) e quelle di *restart*. Ciò perché gli apporti gratuiti avvengono principalmente nelle ore di attività, perciò nel calcolo del loro utilizzo è conservativo considerare che possano contribuire solo al carico termico di

queste ore. Tra l'altro ciò compensa il fatto che nel bilancio vengono considerati gli interi apporti gratuiti giornalieri e non solo quelli che avvengono nelle ore di attività. Questo tipo di calcolo conduce a errori importanti solo se le ore di attività risultano molto piccole rispetto alle ore di sole.

Il fattore di utilizzazione nei giorni di non funzionamento assume la forma seguente:

$$\eta_{H,gn,nf} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma_{H,nf}^{a_{H,nf}}}{1 - \gamma_{H,nf}^{a_{H,nf} + 1}} & \xrightarrow{se} \gamma_{H,nf} > 0 \neq 1 \\ \frac{a_{H,nf}}{a_{H,nf} + 1} & \xrightarrow{se} \gamma_{H,nf} = 1 \\ \frac{1}{\gamma_{H,nf}} & \xrightarrow{se} \gamma_{H,nf} < 0 \end{cases} \quad [2.1-13]$$

dove:

$$\gamma_{H,nf} = \frac{Q_{H,gn,nf}}{Q_{H,ht,2nf}} \quad [2.1-14]$$

$$a_{H,nf} = a_{H,0} + \frac{\tau_{nf}}{\tau_{H,0}} \quad [2.1-15]$$

e dove:

$\eta_{H,gn,nf}$  = Fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti nella stagione di riscaldamento, nei giorni di non funzionamento.

$\gamma_{H,nf}$  = Rapporto tra tutti gli apporti gratuiti e le dispersioni per trasmissione e ventilazione nelle 24 ore dei giorni di non funzionamento.

$a_{H,nf}$  = Fattore di inerzia termica, nei giorni di non funzionamento.

$a_{H,0}$  = Fattore di inerzia termica di riferimento, fissato dalla norma pari a 1.

$\tau_{H,0}$  = Costante di tempo di riferimento, fissata dalla norma a 15h.

$$\tau = \frac{C_m}{H_{ve,adj,nf} + H_{tr,adj}} \quad [2.1-12]$$

= Costante di tempo della zona termica, funzione della capacità termica e dei coefficienti globali di scambio termico per trasmissione e ventilazione, nei giorni di non funzionamento.

Nel calcolo del fattore di utilizzazione nei giorni di non funzionamento vengono presi in considerazione gli interi apporti (diurni e notturni) e tutte le dispersioni che avvengono nelle 24 ore a temperatura media giornaliera.

## 2.2 Bilancio energetico estivo

### 2.2.1 Bilancio energetico estivo con metodo normativo

Nella **stagione estiva** il bilancio energetico assume la forma riportata in [2.2-1].

$$Q_{C,cont,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad [2.2-1]$$

dove:

$Q_{C,cont,nd}$  = Fabbisogno energetico per raffrescamento continuo.

$Q_{C,gn}$  = Apporti termici totali (interni e solari).

$Q_{C,ht}$  = Scambio termico totale per trasmissione e ventilazione.

$Q_{C,tr}$  = Scambio termico totale per trasmissione nel caso di raffrescamento.

$Q_{C,ve}$  = Scambio termico per ventilazione nel caso di raffrescamento.

$Q_{C,int}$  = Apporti termici interni.

$Q_{C,sol}$  = Apporti termici solari.

$\eta_{C,ls}$  = Fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

Anche per il bilancio estivo è stato introdotto il pedice “<sub>cont</sub>” per indicare che si tratta di un riscaldamento continuo e per differenziarlo dal riscaldamento discontinuo di cui si parlerà successivamente.

Si considerano integralmente gli apporti interni e solari, mentre gli scambi per trasmissione e ventilazione vengono moltiplicati per il “fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti” che esprime il loro effettivo utilizzo in funzione del loro segno (in estate tali scambi possono innalzare o abbassare il carico termico), della quantità di apporti rispetto alle dispersioni ed in funzione dell’inerzia termica dell’edificio. Se gli scambi per trasmissione e ventilazione accrescono i carichi termici estivi essi vengono considerati



integralmente. In caso contrario più il rapporto apporti/dispersioni è alto, maggiore è il loro utilizzo, più l'inerzia termica dell'edificio è elevata, maggiore è il loro utilizzo.

Il fattore di utilizzazione degli apporti, a sua volta, assume la forma seguente:

$$\eta_{C,ls} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma_C^{-a_C}}{1 - \gamma_C^{-(a_C+1)}} & \xrightarrow{se} \gamma_C > 0 \quad \gamma_C \neq 1 \\ \frac{a_C}{a_C + 1} & \xrightarrow{se} \gamma_C = 1 \\ 1 & \xrightarrow{se} \gamma_C < 0 \end{cases} \quad [2.2-2]$$

dove:

$$\gamma_C = \frac{Q_{C,gn}}{Q_{C,ls}} = - \frac{Q_{C,gn}}{Q_{C,ht}} \quad [2.2-3]$$

$$a_C = a_{C,0} + \frac{\tau}{\tau_{C,0}} - k \frac{A_w}{A_f} \quad [2.2-4]$$

e dove:

$\eta_{C,ls}$  = Fattore di utilizzazione delle dispersioni per trasmissione e ventilazione nella stagione di raffrescamento.

$\gamma_C$  = Rapporto tra apporti gratuiti e scambi per trasmissione e ventilazione.

**NOTA IMPORTANTE:** La formula 2.2-4 è la versione corretta di quella riportata nella norma UNI TS 11300 -1 15.1.2. Infatti, come appare evidente anche nella ISO 13790 12.2.1.2, al denominatore devono essere poste le perdite, oppure gli apporti cambiati di segno.

$a_C$  = Fattore di inerzia termica.

$a_{C,0}$  = Fattore di inerzia termica di riferimento, fissato dalla norma pari a 8,1.

$\tau_{C,0}$  = Costante di tempo di riferimento, fissata dalla norma a 17h.

$k$  = Costante di riferimento, fissata dalla norma a 13.

$A_w$  = Superficie finestrata della zona termica.

$A_f$  = Superficie utile in pianta della zona termica.

$$\tau = \frac{C_m}{H_{ve,adj} + H_{tr,adj}} \quad [2.2-5]$$

= Costante di tempo della zona termica, funzione della capacità termica e dei coefficienti globali di scambio termico per trasmissione e ventilazione durante il periodo di riferimento.

Il grafico del fattore di utilizzo può essere consultato al paragrafo 2.1.1.

In sostanza viene effettuato un unico bilancio termico mensile, esteso a tutti i giorni della stagione estiva, per 24 ore al giorno, comprendente al suo interno gli apporti gratuiti e, per quanto riguarda gli scambi per trasmissione e ventilazione, se questi costituiscono degli apporti di calore vengono considerati integralmente, altrimenti se costituiscono delle dispersioni vengono considerati in parte.

### 2.2.2 **Bilancio energetico estivo con metodo alternativo**

L'elaborazione di un metodo alternativo scaturisce dalle medesime limitazioni di cui al paragrafo 2.1.2.

L'esercizio degli impianti, in particolare quelli di climatizzazione estiva, è infatti molto spesso ridotto a poche ore al giorno, il che conduce sicuramente ad un risparmio rispetto all'esercizio continuo a cui si riferisce la norma.

Inoltre, il fatto che la norma consideri la temperatura esterna sempre costante durante la giornata, conduce ad un forte errore sui risultati, al contrario di quanto non avvenga per la stagione invernale. Infatti nel clima temperato-caldo in cui si trova il nostro Paese l'andamento estivo delle temperature nelle 24 ore è oscillante intorno alla temperatura di set-point interna. Ciò significa che nelle ore diurne gli scambi per trasmissione e ventilazione costituiscono un apporto termico, mentre nelle ore notturne essi rappresentano una dispersione termica. Gli effetti reali di trasmissione e ventilazione sono quindi: un incremento del carico diurno ed un decremento di quello notturno che può essere sfruttato per esempio attraverso sistemi di *free-cooling*. Appare chiaro quindi che il calcolo normativo, che considera una media giornaliera della temperatura esterna, conduca ad errori importanti. Infatti capita quasi sempre che la temperatura media esterna sia quasi identica a quella di set-point, conducendo quindi ad uno scambio termico per trasmissione e ventilazione quasi irrilevante.

Per ovviare a tali limitazioni, il modello alternativo qui presentato prevede l'introduzione di discontinuità durante i periodi di raffrescamento. Per i dettagli sui vari periodi consultare la trattazione invernale al paragrafo 2.1.2 poiché è concettualmente identica a quella estiva.

Questa suddivisione comporta quindi sia un diverso esercizio degli impianti che una diversa valutazione delle temperature di scambio termico. Infatti vengono definite tre temperature esterne, relative ai tre periodi sopra menzionati, calcolate come la media sui relativi periodi della temperatura esterna oraria del luogo. Perciò gli scambi termici di ogni periodo avvengono alla temperatura relativa a quel periodo. Più avanti verrà spiegato nel dettaglio il sistema di calcolo.

Da quanto detto l'equazione generale di bilancio termico assume la seguente forma alternativa alla [2.2-1]:

$$Q_{C,disc,nd} = (Q_{int,f} + Q_{sol,f}) + \eta_{C,ls,f} (Q_{C,ht1} + Q_{C,ht,restart}) \quad [2.2-6]$$

dove:

$Q_{C,disc,nd}$  = Fabbisogno energetico per raffrescamento discontinuo mensile.

$Q_{C,ht1}$  = Scambio termico totale per trasmissione e ventilazione durante le ore di attività.

$Q_{C,ht,restart}$  = Fabbisogno energetico necessario a riportare la temperatura interna a quella di set-point 1 alla fine dei periodi di interruzione. Durante il periodo estivo l'energia di restart è spesso negativa, soprattutto per le interruzioni notturne (viste le temperature favorevoli) ed aiuta quindi a ridurre il carico termico interno.

$Q_{int,f}$  = Apporti termici interni durante le 24 ore dei giorni di funzionamento.

$Q_{sol,f}$  = Apporti termici solari durante le 24 ore dei giorni di funzionamento.

$\eta_{C,ls,f}$  = Fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche nei giorni di funzionamento.

Per il calcolo estivo è stato considerato un solo set-point di raffrescamento che permane durante le ore di attività, mentre il resto del tempo l'impianto rimane spento. Per questa ragione il bilancio termico risulta semplificato rispetto a quello invernale.

Nei bilancio [2.2-6] vengono prese in considerazione le dispersioni complessive di periodo 1 (ore di attività) e quelle di *restart* per riportare la temperatura interna al punto di set-point 1 dopo le interruzioni brevi o lunghe. Gli scambi termici per trasmissione e ventilazione, se favorevoli, vengono sempre ridotti tramite il fattore di utilizzazione.

Il fattore di utilizzazione assume la forma seguente:

$$\eta_{C,ls,f} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma_{H,f}^{-a_{C,f}}}{1 - \gamma_{C,f}^{-(a_{C,f}+1)}} & \xrightarrow{se} \gamma_{C,f} > 0 \neq 1 \\ \frac{a_{C,f}}{a_{C,f} + 1} & \xrightarrow{se} \gamma_{C,f} = 1 \\ \frac{1}{\gamma_{C,f}} & \xrightarrow{se} \gamma_{C,f} < 0 \end{cases} \quad [2.2-7]$$

dove:

$$\gamma_{C,f} = \begin{cases} -\frac{Q_{C,gn,f}}{Q_{C,ht,1} + Q_{C,ht,restart}} & \xrightarrow{se} Q_{C,ht,1} \text{ e } Q_{C,ht,restart} \text{ hanno stesso segno} \\ -\frac{Q_{C,gn,f} + Q_{C,ht,1}}{Q_{C,ht,restart}} & \xrightarrow{se} Q_{C,ht,1} > 0 \text{ e } Q_{C,ht,restart} < 0 \\ -\frac{Q_{C,gn,f} + Q_{C,ht,restart}}{Q_{C,ht,1}} & \xrightarrow{se} Q_{C,ht,1} < 0 \text{ e } Q_{C,ht,restart} > 0 \end{cases} \quad [2.2-8]$$

$$a_{C,f} = a_{C,0} + \frac{\tau_f}{\tau_{C,0}} - k \frac{A_w}{A_f} \quad [2.2-9]$$

e dove:

$\eta_{C,ls,f}$  = Fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche nella stagione di raffrescamento, nei giorni di funzionamento.

$\gamma_{C,f}$  = Rapporto tra scambi termici modificato rispetto alla formulazione della norma.

$a_{C,f}$  = Fattore di inerzia termica, nei giorni di funzionamento.

$a_{C,0}$  = Fattore di inerzia termica di riferimento, fissato dalla norma pari a 1.

$\tau_{C,0}$  = Costante di tempo di riferimento, fissata dalla norma a 15h.

$k$  = Costante di riferimento, fissata dalla norma a 13.

$A_w$  = Superficie finestrata della zona termica.

$A_f$  = Superficie utile in pianta della zona termica.

$$\tau = \frac{C_m}{H_{ve,adj,f} + H_{tr,adj}} \quad [2.2-10]$$

= Costante di tempo della zona termica, funzione della capacità termica e dei coefficienti globali di scambio termico per trasmissione e ventilazione, nei giorni di funzionamento.

Nel calcolo del fattore di utilizzazione del metodo alternativo è importante capire esattamente la logica seguita. Il fattore di utilizzazione ha il compito di pesare gli scambi favorevoli (quindi quelli che tenderebbero a ridurre il carico termico), in relazione al loro effettivo utilizzo. L'utilizzo dipende essenzialmente dall'inerzia termica dell'edificio e dal rapporto tra i carichi termici e scambi favorevoli. Il primo fattore ne influenza l'utilizzo perché tali scambi avvengono in periodi diversi rispetto ai carichi termici, perciò l'edificio deve essere in grado di "trattenerli". Il secondo ne influenza l'utilizzo poiché se gli scambi favorevoli diventano paragonabili o superiori ai carichi termici, è molto difficile che potranno essere tutti utilizzati (anche in relazione all'imperfezione del sistema di regolazione dell'impianto), bensì una buona parte viene persa all'esterno o

alimenta fenomeni di “sottotemperatura”. In questa ottica diventa fondamentale il calcolo di  $\gamma_{C,f}$ , che sulla norma è riportato in modo errato, senza il segno meno. Nel metodo alternativo qui sviluppato il calcolo di  $\gamma_{C,f}$  si differenzia a seconda del segno degli scambi termici per trasmissione, ventilazione e *restart*.

- Se  $Q_{C,ht,1}$  e  $Q_{C,ht, restart}$  sono entrambi minori di zero, significa che tutti gli scambi sono favorevoli (es. nei mesi più freddi), allora, dalla 2.2.8, ne risulta un  $\gamma_{C,f}$  maggiore di zero e quindi un fattore di utilizzazione che peserà tali dispersioni in base ai parametri già menzionati.
- Se  $Q_{C,ht,1}$  e  $Q_{C,ht, restart}$  sono entrambi maggiori di zero, significa che tutti gli scambi sono sfavorevoli e diventano carichi termici (es. nei mesi più caldi), allora, dalla 2.2.10, ne risulta un  $\gamma_{C,f}$  minore di zero e quindi un fattore di utilizzazione chiaramente sempre pari ad 1. Ciò poiché la norma considera conservativamente che i carichi termici vengano tutti utilizzati.
- Se  $Q_{C,ht,1}$  è maggiore di zero (carico termico) e  $Q_{C,ht, restart}$  è minore di zero (dispersione), significa che solo gli scambi per restart sono favorevoli (es. nei mesi caldi in cui di notte la temperatura scende al di sotto del set-point), allora, dalla 2.2.10, nel calcolo di  $\gamma_{C,f}$  occorre portare al numeratore  $Q_{C,ht,1}$  poiché esso diventa a tutti gli effetti un carico. In questo caso  $\gamma_{C,f}$  sarà maggiore di zero e quindi si otterrà un fattore di utilizzazione che peserà le dispersioni per restart in base ai parametri già menzionati.
- Se  $Q_{C,ht,1}$  è minore di zero (dispersione) e  $Q_{C,ht, restart}$  è maggiore di zero (carico termico), significa che solo gli scambi per trasmissione e ventilazione diurni sono favorevoli (caso praticamente impossibile nella realtà), allora, dalla 2.2.8, nel calcolo di  $\gamma_{C,f}$  occorre portare al numeratore  $Q_{C,ht, restart}$  poiché esso diventa a tutti gli effetti un carico. In questo caso  $\gamma_{C,f}$  sarà maggiore di zero e quindi si

otterrà un fattore di utilizzazione che peserà le dispersioni per trasmissione e ventilazione in base ai parametri già menzionati.

Il metodo di calcolo alternativo permette quindi di valutare efficacemente l'effetto benefico di una ventilazione differenziata per il giorno e per la notte, sfruttando il cosiddetto *free-cooling*.



## 2.3 Scambio termico per trasmissione invernale

Lo scambio termico per trasmissione viene modellato sempre su base mensile e si compone dello scambio termico verso l'aria esterna, verso il terreno e verso spazi non climatizzati. Nell'approccio della norma UNI TS 11300 -1 fa parte dello scambio per trasmissione anche l'extra-flusso dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste.

Il software Archi-Energy fornisce, anche in questo caso, due calcoli differenti: quello conforme alla normativa UNI TS 11300 e quello alternativo sviluppato nella presente tesi.

### 2.3.1 Equazione generale dello scambio termico per trasmissione invernale con metodo normativo

La norma UNI TS 11300-1 5.2 definisce la seguente equazione generale per lo scambio termico per trasmissione:

$$Q_{H,tr,cont} = H_{tr,adj} (\theta_{H,int,set} - \theta_e) t + \left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \right\} t \quad [2.3-0]$$

dove:

$Q_{H,tr,cont}$  = Flusso di calore scambiato per trasmissione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento continuo dell'impianto di riscaldamento. Il risultato è espresso in *kWh*.

$H_{tr,adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

$\theta_{H,int,set}$  = Temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata.

$\theta_e$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno (da norma UNI 10349 ).

$F_{r,k}$  = Fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste.

$\Phi_{r,mm,k}$  = Extra-flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste del componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo.

$t$  = Durata in ore del mese considerato, 24 ore al giorno, 7 giorni su 7.

La modalità di calcolo proposta conferma le considerazioni fatte nel paragrafo 2.1.1: il calcolo si basa su una temperatura media mensile dell'aria esterna e su un funzionamento continuo dell'impianto di riscaldamento.

Il calcolo dei diversi coefficienti verrà illustrato nei paragrafi riguardanti i parametri di trasmissione.

### 2.3.2 Equazione generale dello scambio termico per trasmissione invernale con metodo alternativo

L'approccio alternativo, come sottolineato ampiamente al paragrafo 2.1.2, fornisce una metodologia di calcolo che abbatte i vincoli di "riscaldamento continuo" e di "temperatura esterna costante". Ne consegue che l'equazione generale dello scambio termico per trasmissione assume una forma diversa dal metodo normativo:

$$Q_{H,tr,disc} = Q_{H,tr,set1} + Q_{H,tr,set2} + Q_{H,restart} \quad [2.3-1]$$

dove:

$Q_{H,tr,disc}$  = Flusso di calore scambiato per trasmissione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento discontinuo dell'impianto di riscaldamento. Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{H,tr,set1}$  = Flusso di calore scambiato per trasmissione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni durante le ore di attività della struttura, ossia nei periodi in cui l'impianto di riscaldamento si trova tarato a set-point 1.

$Q_{H,tr,set2}$  = Flusso di calore scambiato per trasmissione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni durante le ore di non attività della struttura, ossia nei periodi in cui l'impianto di riscaldamento si trova tarato a set-point 2.

$Q_{H,tr,restart}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo a set-point ridotto oppure un periodo di spegnimento totale dell'impianto.

E' interessante analizzare le relazioni che esplicitano i singoli componenti, in quanto andranno a partecipare direttamente ai bilanci termici di cui alle formule 2.1-7 e 2.1-8:

$$Q_{H,tr,set1} = H_{tr,adj}(\theta_{H,i,set1} - \theta_{e,mean,1})t_{H,1} + \left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \right\} t_{H,1} \quad [2.3-2]$$

$$Q_{H,tr,set2} = H_{tr,adj}(\theta_{H,i,set2} - \theta_{e,mean,2f})t_{H,2,on,f} + H_{tr,adj}(\theta_{H,i,set2} - \theta_{e,mean})t_{H,2,nf} + \left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \right\} t_{H,2} \quad [2.3-3]$$

$$Q_{H,tr,restart} = Q_{H,tr,restart,day}(N_{days,f} - N_{days,nf}) + Q_{H,tr,restart,max} N_{days,nf} \quad [2.3-4]$$

dove:

$H_{tr,adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

$F_{r,k}$  = Fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste.

$\Phi_{r,mn,k}$  = Extra-flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste del componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo.

$\theta_{H,i,set1}$  = Temperatura interna di regolazione (set-point 1) per il riscaldamento della zona considerata durante le ore di attività.

$\theta_{H,i,set2}$  = Temperatura interna di regolazione (set-point 2) per il riscaldamento della zona considerata durante le ore di non attività (stesso valore sia per le ore di inattività notturna, che per quelle dei giorni di chiusura).

$\theta_{H,i,end-t2f}$  = Temperatura interna della zona termica alla fine del periodo di interruzione breve nei giorni di funzionamento (es. all'alba prima della

riaccensione a set-point 1). Il calcolo di tale temperatura verrà esposto ampiamente in seguito.

$\theta_{e,mean} = \theta_{e,mean,2,nf}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle 24 ore.

$\theta_{e,mean,1}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle ore di attività, cioè sulle ore in cui l'impianto si trova a set-point 1.

$\theta_{e,mean,2,f}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle ore di non attività dei giorni di funzionamento, cioè sulle ore di interruzione breve giornaliera (per es. notturna) in cui l'impianto si trova a set-point 2.

$t_{H,1}$  = Somma mensile delle ore di attività (totale ore a set-point 1).

$t_{H,2}$  = Somma mensile delle ore di non attività (totale ore a set-point 2).

$t_{H,2,f}$  = Somma mensile delle ore complessive di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di riscaldamento è esercito a set-point 2.

$t_{H,2,on,f}$  = Somma mensile delle ore di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di riscaldamento è effettivamente acceso. Questo tempo non coincide con l'intero periodo notturno poiché prima dell'attivazione dell'impianto occorre che la temperatura interna scenda sotto al set-point 2 ( $\theta_{H,i,set2}$ ), perciò dipende dalla costante di tempo di raffreddamento dell'edificio e dalla temperatura esterna. Il calcolo di  $t_{H,2,on,f}$  verrà approfondito più avanti.

$t_{H,2,nf}$  = Somma mensile delle ore di non attività dei giorni di non funzionamento (es. ore del weekend o dei periodi di chiusura aziendale) in cui l'impianto di riscaldamento è esercito a set-point 2.

$Q_{H,tr,restart,day}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di interruzione breve a set-point 2 (es. attenuazione notturna).

$Q_{H,tr, restart, max}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di interruzione lunga a set-point 2 (es. weekend).

$N_{days, f}$  = Numero di giorni di funzionamento (almeno un'ora di attività).

$N_{days, nf}$  = Numero di giorni di non funzionamento (nessuna ora di attività).

Le tre relazioni 2.3-2, 2.3-3 e 2.3-4 individuano quindi tre differenti flussi termici relativi ai tre periodi fondamentali di cui al paragrafo 2.1.1.

Il calore dovuto al *restart* assume una forma diversa dalle altre relazioni in quanto non si tratta di un vero scambio per trasmissione, ma piuttosto è l'integrale nel tempo dell'energia persa dall'edificio durante la sua fase di raffreddamento. Si tratta quindi di uno scambio a temperatura variabile di non facile trattazione matematica. Per questo motivo il modello si basa su alcune ipotesi semplificative.

Per prima cosa il contributo di restart viene suddiviso in due componenti: il cosiddetto *restart-day*, che riguarda gli scambi energetici durante le interruzioni brevi (es. notturne), ed il *restart-max* che riguarda invece le interruzioni che si protraggono per uno o più giorni (es. ferie o weekend).

La prima è fortemente soggetta all'inerzia termica dell'edificio in quanto è relativa ad un periodo che avviene subito dopo il set-point 1 e si protrae per poche ore. Per il calcolo del restart-day si considera quindi l'edificio come un corpo a temperatura  $\theta_{H,t, set1}$  che si raffredda nel tempo in un ambiente a temperatura  $\theta_{e, mean, 2, f}$  con andamento determinato dalla sua costante di tempo  $\tau_{2, f}$ , così come descritto dall'equazione 2.3-7.

La seconda è invece quasi indipendente dall'inerzia termica infatti, dopo alcuni giorni di interruzione, l'effetto di un precedente riscaldamento tende a scomparire. Per questo motivo, con un approccio conservativo, si considera che l'edificio debba essere riscaldato dalla temperatura maggiore tra quella media esterna  $\theta_{e,mean}$  e quella di set-point 2  $\theta_{H,i,set2}$ , fino a quella di set-point 1.

Infine, dal momento che la diminuzione di temperatura è causata congiuntamente da trasmissione e ventilazione, si isola la quota imputabile alla sola trasmissione moltiplicando i risultati per il rapporto tra il coefficiente di scambio termico per trasmissione e quello globale.

$$Q_{H,tr,restart,day} = C_{mean} (\theta_{H,i,set1} - \theta_{H,i,end-t2f}) \frac{H_{tr,adj}}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj,set2}} \quad [2.3-5]$$

$$Q_{H,tr,restart,max} = C_{mean} (\theta_{H,i,set1} - \max(\theta_{e,mean}; \theta_{H,i,set2})) \frac{H_{tr,adj}}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj,set2}} \quad [2.3-6]$$

$C_{mean}$  = Capacità termica media dell'edificio [kWh/K]

$H_{tr,adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

$H_{ve,adj,set2}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, calcolato a set-point 2 e corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

Da quanto detto, il calcolo più complesso riguarda la temperatura di fine interruzione  $\theta_{H,i,end-t2f}$  e il tempo effettivo in cui l'impianto rimane acceso a set-point 2  $t_{H,2,on,f}$ .

Per giungere a questi risultati si è modellato l'edificio come una massa omogenea con capacità termica  $C_{mean}$  e caratterizzata dai coefficienti di scambio termico per trasmissione  $H_{tr,adj}$  e ventilazione  $H_{ve,adj,set2}$ .

Risolvendo l'equazione differenziale dello scambio termico nel tempo si ottiene la seguente equazione:

$$\theta_{H,i,end-t2f} = \begin{cases} \theta_{H,i,set2} \xrightarrow{se} t_{H,2,on,f} \leq t_{H,2,f} \\ \theta_{H,i,set1} - \left(1 - e^{-\frac{t_{H,2,f}}{\tau_{2,f}}}\right) (\theta_{H,i,set1} - \theta_{e,mean,2f}) \longrightarrow \text{altrimenti} \end{cases} \quad [2.3-7]$$

dove:

$$\tau_{H,2,f} = \frac{C_{mean}}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj,2,f}} \quad [2.3-8]$$

$$C_{mean} = \sum_{superfici} C_{sup} A \quad [2.3-9]$$

Il significato dei simboli è il seguente:

$\theta_{H,i,end-t2f}$  = Temperatura interna della zona termica alla fine del periodo di interruzione breve nei giorni di funzionamento (es. all'alba prima della riaccensione a set-point 1). Il calcolo di tale temperatura verrà esposto ampiamente in seguito.

$\theta_{H,i,set1}$  = Temperatura interna di regolazione (set-point 1) per il riscaldamento della zona considerata durante le ore di attività.



$\theta_{H,i,set2}$  = Temperatura interna di regolazione (set-point 2) per il riscaldamento della zona considerata durante le ore di non attività (stesso valore sia per le ore di inattività notturna, che per quelle dei giorni di chiusura).

$\theta_{e,mean,2,f}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle ore di non attività dei giorni di funzionamento, cioè sulle ore di interruzione breve giornaliera (per es. notturna) in cui l'impianto si trova a set-point 2.

$t_{H,2}$  = Somma mensile delle ore di non attività (totale ore a set-point 2).

$t_{H,2,f}$  = Somma mensile delle ore complessive di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di riscaldamento è esercito a set-point 2.

$t_{H,2,on,f}$  = Somma mensile delle ore di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di riscaldamento è effettivamente acceso. Questo tempo non coincide con l'intero periodo notturno poiché prima dell'attivazione dell'impianto occorre che la temperatura interna scenda sotto al set-point 2 ( $\theta_{H,i,set2}$ ), perciò dipende dalla costante di tempo di raffreddamento dell'edificio e dalla temperatura esterna. Il calcolo di  $t_{H,2,on,f}$  verrà approfondito più avanti.

$t_{H,2,nf}$  = Somma mensile delle ore di non attività dei giorni di non funzionamento (es. ore del weekend o dei periodi di chiusura aziendale) in cui l'impianto di riscaldamento è esercito a set-point 2.

$\tau_{H,2,f}$  = Costante di tempo dell'edificio nelle ore complessive di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di riscaldamento è esercito a set-point 2.

$C_{mean}$  = Capacità termica media dell'edificio [kWh/K]

$C_{sup}A$  = Capacità termica superficiale edificio [kWh/mqK] moltiplicata per il componente edilizio corrispondente.

$H_{tr,adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio [W/K].

$H_{ve,adj,set2}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, calcolato a set-point 2 e corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio [W/K].

Il senso della 2.3-7 è che la temperatura di fine periodo 2 è pari a quella di raffreddamento libero se non viene raggiunto il set-point 2, altrimenti è pari a quella di set-point 2, essendo mantenuta dall'impianto di riscaldamento.

Nel bilancio di raffreddamento notturno non sono stati presi in considerazione i carichi termici solari ed interni, nonché l'extra-flusso per radiazione infrarossa. Infatti i primi si considerano trascurabili, poiché il periodo di interruzione breve coincide nella quasi totalità dei casi con la notte dove non c'è irraggiamento solare e neppure grandi carichi termici interni. Ciò comporta una sottostima (conservativa) della temperatura di fine raffreddamento. In ogni caso il modello prevede l'inserimento degli interi carichi termici interni e solari all'interno del bilancio delle ore di attività. Ciò tende a sovrastimare l'apporto termico solo nei casi in cui le ore di attività siano molto ridotte rispetto alle ore totali diurne. Questa sovrastima viene in ogni caso limitata dalla sottostima di cui sopra e dal fatto che il fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti viene calcolato considerando solamente le dispersioni che avvengono nelle ore di attività (escludendo quindi il *restart*). In sostanza è come se in tutta la fase di pre-riscaldamento del mattino, in cui la temperatura risale al set-point 1, non vi fossero apporti gratuiti. Ciò porta ad un fattore di utilizzazione più basso e quindi tende a ridurre la sovrastima di cui sopra. L'extra-flusso, invece, non viene valutato nel calcolo del raffreddamento della struttura,

però viene poi aggiunto integralmente nel bilancio termico finale, quindi anch'esso viene leggermente sovrastimato e tende a bilanciare l'effetto dei maggiori apporti gratuiti.

In base all'andamento della temperatura interna, il tempo effettivo in cui questa risulta inferiore al set-point2 determina il tempo effettivo di accensione dell'impianto di riscaldamento:

$$t_{H,2,on,f} = \begin{cases} t_{H,2f} - \tau_{2,f} \ln \left( \frac{\theta_{H,i,set 2} - \theta_{e,mean,2}}{\theta_{H,i,set 1} - \theta_{e,mean,2}} \right) & \xrightarrow{se} > 0 \\ 0 & \longrightarrow \text{altrimenti} \end{cases} \quad [2.3-10]$$

Ne risulta che il tempo di accensione notturno è pari a zero se l'edificio non si raffredda abbastanza per far attivare l'impianto a set-point 2, altrimenti è pari al tempo risultante dal processo di raffreddamento notturno.

## 2.4 Scambio termico per trasmissione estivo

Come per lo scambio termico per trasmissione invernale, esso viene modellato su base mensile e si compone dello scambio termico verso l'aria esterna, verso il terreno e verso spazi non climatizzati. Nell'approccio della norma UNI TS 11300 -1 fa parte dello scambio per trasmissione anche l'extra-flusso dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste.

Il software Archi-Energy fornisce, anche in questo caso, due calcoli differenti: quello conforme alla normativa UNI TS 11300 e quello alternativo sviluppato nella presente tesi.

### 2.4.1 Equazione generale dello scambio termico per trasmissione estivo con metodo normativo

La norma UNI TS 11300-1 5.2 definisce la seguente equazione generale per lo scambio termico per trasmissione:

$$Q_{C,tr,cont} = H_{tr,adj}(\theta_{int,set,C} - \theta_e)t + \left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \right\} t \quad [2.4-0]$$

dove:

$Q_{C,tr,cont}$  = Flusso di calore scambiato per trasmissione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento continuo dell'impianto di riscaldamento. Il risultato è espresso in *kWh*.

$H_{tr,adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

$\theta_{C,int, set}$  = Temperatura interna di regolazione per il raffrescamento della zona considerata.

$\theta_e$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno (da norma UNI 10349 ).

$F_{r,k}$  = Fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste.

$\Phi_{r,mm,k}$  = Extra-flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste del componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo.

$t$  = Durata in ore del mese considerato, 24 ore al giorno, 7 giorni su 7.

La modalità di calcolo proposta conferma le considerazioni fatte nel paragrafo 2.2.1: il calcolo si basa su una temperatura media mensile dell'aria esterna e su un funzionamento continuo dell'impianto di raffrescamento.

Il calcolo dei diversi coefficienti verrà illustrato nei paragrafi riguardanti i parametri di trasmissione.

### 2.4.2 Equazione generale dello scambio termico per trasmissione estivo con metodo alternativo

L'approccio alternativo, come sottolineato ampiamente al paragrafo 2.2.2, fornisce una metodologia di calcolo che abbatte i vincoli di "raffrescamento continuo" e di "temperatura esterna costante". Ne consegue che l'equazione generale dello scambio termico per trasmissione assume una forma diversa dal metodo normativo:

$$Q_{C,tr,disc} = Q_{C,tr,set1} + Q_{C,restart} \quad [2.4-1]$$

dove:

$Q_{C,tr,disc}$  = Flusso di calore scambiato per trasmissione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento discontinuo dell'impianto di raffrescamento. Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{C,tr,set1}$  = Flusso di calore scambiato per trasmissione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni durante le ore di attività della struttura, ossia nei periodi in cui l'impianto di raffrescamento si trova tarato a set-point 1.

$Q_{C,tr,restart}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di spegnimento dell'impianto.

Nel caso estivo si nota che scompare il termine relativo al set-point 2 in quanto si considera che l'impianto di raffrescamento possa lavorare solamente al set-point 1.

E' interessante analizzare le relazioni che esplicitano i singoli componenti, in quando andranno a partecipare direttamente ai bilanci termici di cui alle formule 2.1-7 e 2.1-8:

$$Q_{C,tr,set1} = H_{tr,adj} (\theta_{C,i,set1} - \theta_{e,mean,1}) t_{C,1} + \left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \right\} t_{C,1} \quad [2.4-2]$$

$$Q_{C,tr,restart} = Q_{C,tr,restart,day} (N_{days,f} - N_{days,nf}) + Q_{C,tr,restart,max} N_{days,nf} \quad [2.4-3]$$

dove:

$H_{tr,adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

$F_{r,k}$  = Fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste.

$\Phi_{r,mn,k}$  = Extra-flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste del componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo.

$\theta_{C,t,set1}$  = Temperatura interna di regolazione (set-point 1) per il raffrescamento della zona considerata durante le ore di attività.

$\theta_{e,mean,1}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle ore di attività, cioè sulle ore in cui l'impianto si trova a set-point 1.

$t_{C,1}$  = Somma mensile delle ore di attività (totale ore a set-point 1).

$Q_{C,tr,restart,day}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di interruzione breve a set-point 2 (es. spegnimento notturno).

$Q_{C,tr,restart,max}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di interruzione lunga a set-point 2 (es. weekend).

$N_{days,f}$  = Numero di giorni di funzionamento (almeno un'ora di attività).

$N_{days,nf}$  = Numero di giorni di non funzionamento (nessuna ora di attività).

Il raffrescamento aggiuntivo dovuto al *restart*, parallelamente al caso invernale, assume una forma diversa dalle altre relazioni in quanto non si tratta di un vero scambio per trasmissione, ma piuttosto è l'integrale nel tempo dell'energia scambiata dall'edificio durante la fase di spegnimento del raffrescamento. Si tratta quindi di uno scambio a temperatura variabile di non facile trattazione matematica. Per il caso estivo vi è inoltre una complicazione ulteriore: mentre d'inverno la temperatura esterna è sempre inferiore a quella di set-point, d'estate questa può oscillare nell'intorno del set-point. Ciò significa che durante il periodo di interruzione si può verificare un raffrescamento oppure un riscaldamento della struttura, a seconda del clima e del mese considerato. Dunque l'energia di *restart* questa volta può essere positiva oppure negativa. Per questo motivo anche in questo caso il modello si basa su alcune ipotesi semplificative.

Anche per il calcolo estivo il contributo di restart viene suddiviso in due componenti: il cosiddetto *restart-day*, che riguarda gli scambi energetici durante le interruzioni brevi (es. notturne), ed il *restart-max* che riguarda invece le interruzioni che si protraggono per uno o più giorni (es. ferie o weekend).

La prima è fortemente soggetta all'inerzia termica dell'edificio in quanto è relativa ad un periodo che avviene subito dopo il set-point 1 e si protrae per poche ore. Per il calcolo del *restart-day* si considera quindi l'edificio come un corpo a temperatura un  $\theta_{C,t,set1}$  che scambia calore nel tempo in un ambiente a temperatura  $\theta_{e,mean,2,f}$  con andamento determinato dalla sua costante di tempo  $\tau_{C,2,f}$ , così come descritto dall'equazione 2.4-7.

La seconda è invece quasi indipendente dall'inerzia termica infatti, dopo alcuni giorni di interruzione, l'effetto di un precedente riscaldamento tende a scomparire. Per questo



motivo, con un approccio conservativo, si considera che l'edificio debba essere riportato dalla temperatura media esterna  $\theta_{e,mean}$  fino a quella di set-point 1.

Infine, dal momento che la diminuzione di temperatura è causata congiuntamente da trasmissione e ventilazione, si isola la quota imputabile alla sola trasmissione moltiplicando i risultati per il rapporto tra il coefficiente di scambio termico per trasmissione e quello globale.

$$Q_{C,tr, restart, day} = C_{mean} (\theta_{C,i, set1} - \theta_{C,i, end-t2f}) \frac{H_{tr, adj}}{H_{tr, adj} + H_{ve, adj, freecool}} \quad [2.4-4]$$

$$Q_{C,tr, restart, max} = C_{mean} (\theta_{C,i, set1} - \theta_{e, mean}) \frac{H_{tr, adj}}{H_{tr, adj} + H_{ve, adj, set2}} \quad [2.4-5]$$

$C_{mean}$  = Capacità termica media dell'edificio [kWh/K]

$H_{tr, adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

$H_{ve, adj, freecool}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, calcolato al set-point impostato per il *free-cooling* e corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio. Si applica alle ore di non attività (notturne) dei giorni di funzionamento.

$H_{ve, adj, set2}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, calcolato a set-point 2 e corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie

superfici che delimitano lo spazio. Si applica alle 24 ore dei giorni di non funzionamento.

Da quanto detto, il calcolo più complesso riguarda la temperatura di fine interruzione

$$\theta_{C,i,end-t2f}$$

Per giungere a questo risultato si è modellato l'edificio come una massa omogenea con capacità termica  $C_{mean}$  e caratterizzata dai coefficienti di scambio termico per trasmissione  $H_{tr,adj}$  e ventilazione  $H_{ve,adj,freecool}$ .

Risolviendo l'equazione differenziale scambio termico nel tempo si ottiene la seguente equazione:

$$\theta_{C,i,end-t2f} = \theta_{C,i,set1} - \left( 1 - e^{-\frac{t_{C,2,f}}{\tau_{2,f}}} \right) (\theta_{C,i,set1} - \theta_{e,mean,2f}) \quad [2.4-6]$$

dove:

$$\tau_{C,2,f} = \frac{C_{mean}}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj,freecool}} \quad [2.4-7]$$

$$C_{mean} = \sum_{\text{superfici}} C_{sup} A \quad [2.4-8]$$

Il significato dei simboli è il seguente:

$\theta_{C,i,end-t2f}$  = Temperatura interna della zona termica alla fine del periodo di interruzione breve nei giorni di funzionamento (es. all'alba prima della riaccensione a set-point 1). Il calcolo di tale temperatura verrà esposto ampiamente in seguito.

$\theta_{C,t,set1}$  = Temperatura interna di regolazione (set-point 1) per il raffrescamento della zona considerata durante le ore di attività.

$\theta_{e,mean,2,f}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle ore di non attività dei giorni di funzionamento, cioè sulle ore di interruzione breve giornaliera (per es. notturna) in cui l'impianto di raffrescamento è spento.

$t_{C,2,f}$  = Somma mensile delle ore complessive di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di raffrescamento è spento.

$\tau_{C,2,f}$  = Costante di tempo dell'edificio nelle ore complessive di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di raffrescamento è spento.

$C_{mean}$  = Capacità termica media dell'edificio [kWh/K]

$C_{sup}A$  = Capacità termica superficiale edificio [kWh/mqK] moltiplicata per il componente edilizio corrispondente.

$H_{tr,adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

$H_{ve,adj,freecool}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, calcolato al set-point impostato per il *free-cooling* e corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio. Si applica alle ore di non attività (notturne) dei giorni di funzionamento.

$H_{ve,adj,set2}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, calcolato a set-point 2 e corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie

superfici che delimitano lo spazio. Si applica alle 24 ore dei giorni di non funzionamento.

A differenza del caso invernale, la 2.4-6 indica che la temperatura di fine periodo 2 è sempre pari a quella di raffreddamento libero poiché non è presente un set-point 2.

Parallelamente al caso invernale, nel bilancio termico di interruzione notturna non sono stati presi in considerazione i carichi termici solari ed interni, nonché l'extra-flusso per radiazione infrarossa. Infatti i primi si considerano trascurabili, poiché il periodo di interruzione breve coincide nella quasi totalità dei casi con la notte dove non c'è irraggiamento solare e neppure grandi carichi termici interni. Ciò comporta una sottostima della temperatura di fine interruzione. In ogni caso il modello prevede l'inserimento degli interi carichi termici interni e solari all'interno del bilancio delle ore di attività. Ciò tende a sovrastimare (conservativamente) l'apporto termico diurno, considerando quindi che l'impianto di raffrescamento debba in ogni caso far fronte agli interi carichi termici delle 24 ore. Questa sovrastima viene in ogni caso limitata dalla sottostima di cui sopra.

L'extra-flusso, invece, non viene valutato nel calcolo del raffreddamento della struttura, però viene poi aggiunto integralmente nel bilancio termico finale, quindi anch'esso viene leggermente sovrastimato e tende a bilanciare l'effetto dei maggiori apporti gratuiti.

## 2.5 Coefficienti di scambio termico per trasmissione

Gli scambi per trasmissione, descritti nei paragrafi 2.3 e 2.4, si basano sulla conoscenza dei coefficienti di scambio termico per trasmissione dei vari componenti dell'edificio. Essi definiscono la tendenza dell'involucro edilizio a permettere il passaggio di calore in presenza di una differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno.

Il software Archi-Energy fornisce in questo caso un solo calcolo, conforme alla norma UNI TS 11300-1, sia per il metodo normativo che per quello alternativo. L'unica differenza riguarda l'implementazione di un modello matematico innovativo per ciò che concerne gli scambi termici con spazi non climatizzati in cui vi sia apporto solare (es. serre, sottotetti, ambienti soleggiati, ecc).

### 2.5.1 Coefficiente di scambio termico per trasmissione con l'aria esterna

Si riporta la formula generale descritta dalla norma ISO 13790 8.3.1, riadattata considerando i ponti termici come incremento percentuale del flusso termico:

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j \chi_j \cong \sum_i A_i U_i (1 + PT) \quad [2.5-1]$$

dove:

$H_D$  = Coefficiente di scambio termico per trasmissione verso gli ambienti esterni della zona considerata  $\left[ \frac{W}{K} \right]$ .

$A_i$  = Area del componente edilizio 'i' confinante con l'esterno [ $m^2$ ].

$U_i$  = Trasmittanza termica del componente edilizio 'i' confinante con l'esterno

$$\left[ \frac{W}{m^2 K} \right].$$

$l_k$  = Lunghezza del ponte termico lineare [m].

$\psi_k$  = Trasmittanza termica lineica del ponte termico 'k'  $\left[ \frac{W}{mK} \right]$ .

$\chi_j$  = Trasmittanza termica puntuale del ponte termico 'j'  $\left[ \frac{W}{K} \right]$ .

$PT$  = Fattore percentuale approssimato di incremento degli scambi termici dovuti alla presenza di ponti termici.

Il calcolo 2.5-1 deve essere esteso a tutte le superfici, trasparenti ed opache, confinanti con l'esterno e quindi sottoposte allo stesso  $\Delta\theta$ .

### 2.5.2 Coefficiente di scambio termico per trasmissione con il terreno

Si riporta la formula generale descritta dalla norma UNI TS 11300 11.3, riadattata considerando i ponti termici come incremento percentuale del flusso termico:

$$H_{g,adj} = b_{tr,g} A U_f (1 + PT) \quad [2.5-2]$$

dove:

$H_{g,adj}$  = Coefficiente di scambio termico per trasmissione verso il terreno della zona considerata  $\left[ \frac{W}{K} \right]$ .

$b_{tr,g}$  = Fattore di correzione dello scambio termico dovuto al  $\Delta\theta$  ridotto presente nello scambio termico col terreno. I valori sono estratti dal prospetto 6 della norma succitata e riportato di seguito.

$A_i$  = Area del componente edilizio 'i' confinante con l'esterno [ $m^2$ ].

$U_i$  = Trasmittanza termica del componente edilizio 'i' confinante con l'esterno  $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ .

$l_k$  = Lunghezza del ponte termico lineare [m].

$\psi_k$  = Trasmittanza termica lineica del ponte termico 'k'  $\left[ \frac{W}{mK} \right]$ .

$\chi_j$  = Trasmittanza termica puntuale del ponte termico 'j'  $\left[ \frac{W}{K} \right]$ .

$PT$  = Fattore percentuale approssimato di incremento degli scambi termici dovuti alla presenza di ponti termici.

**Fattore di correzione  $b_{tr,g}$**

Ambiente confinante	$b_{tr,g}$
Pavimento controterra	0,45
Parete controterra	0,45
Pavimento su vespaio aerato	0,80

Il calcolo 2.5-1 deve essere esteso a tutte le superfici confinanti con l'esterno e quindi sottoposte allo stesso  $\Delta\theta$ .

Va sottolineato che il calcolo mediante i coefficienti  $b_{tr,g}$  consigliati dalla norma conduce a errori sostanziali soprattutto nel periodo estivo, quando la temperatura del terreno è tipicamente inferiore a quella esterna. Andrebbe quindi calcolato un valore di  $b_{tr,g}$  per ogni mese. Va comunque detto che gli errori estivi sono di tipo conservativo.

### 2.5.3 Coefficiente di scambio termico per trasmissione con spazi non climatizzati

Per ciò che concerne gli spazi non climatizzati il software Archi Energy utilizza un approccio che si discosta da quello normativo solo per gli spazi con rilevante apporto solare (serre, sottotetti, spazi soleggiati, ecc).

L'equazione generale del coefficiente di scambio termico per trasmissione verso locali non climatizzati è la seguente:

$$H_{U,adj} = \sum_x b_{tr,x} A_x U_x \quad [2.5-3]$$

dove:

$H_{U,adj}$  = Coefficiente di scambio termico per trasmissione verso locali non climatizzati  $\left[ \frac{W}{K} \right]$ .

$b_{tr,x}$  = Fattore di correzione dello scambio termico dovuto al diverso  $\Delta\theta$  presente nello scambio termico coi locali non climatizzati.

$A_x$  = Area del componente edilizio 'x' confinante con spazi non climatizzati [ $m^2$ ].

$U_x$  = Trasmittanza termica del componente edilizio 'x' confinante con spazi non climatizzati  $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ .

Il punto più delicato è chiaramente il calcolo del coefficiente  $b_{tr,x}$ . Il software Archi-Energy propone le tre differenti metodologie di calcolo che seguono:

1. SPAZI A TEMPERATURA FISSA;
2. SPAZI NON CLIMATIZZATI STANDARD;
3. SPAZI NON CLIMATIZZATI SOLEGGIATI (in particolare SERRE e SOTTOTETTI).



### 1. SPAZI A TEMPERATURA FISSA

Questo modello si adatta bene agli spazi che vengono mantenuti costantemente ad una temperatura prefissata. Locali di questo tipo sono ad esempio spazi adiacenti riscaldati a temperatura diversa da quella della zona termica esaminata.

In questi spazi il coefficiente  $b_{tr,x}$  è calcolato come segue:

$$b_{tr} = \frac{\theta_u - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad [2.5-4]$$

Si tratta quindi di una semplice scalatura del  $\Delta\theta$  interno-esterno in modo proporzionale al  $\Delta\theta$  interno-locale non climatizzato.

### 2. SPAZI NON CLIMATIZZATI STANDARD

Questo modello riprende le indicazioni del prospetto 5 della norma UNI TS 11300-1, che riporta i valori consigliati del fattore di correzione  $b_{tr,x}$ :

**Fattore di correzione  $b_{tr,x}$**

Ambiente confinante	$b_{tr,x}$
<b>Ambiente</b>	
- con una parete esterna	0,4
- senza serramenti esterni e con almeno due pareti esterne	0,5
- con serramenti esterni e con almeno due pareti esterne (per esempio autorimesse)	0,6
- con tre pareti esterne (per esempio vani scala esterni)	0,8
<b>Piano interrato o seminterrato</b>	
- senza finestre o serramenti esterni	0,5
- con finestre o serramenti esterni	0,8
<b>Sottotetto</b>	
- tasso di ventilazione del sottotetto elevato (per esempio tetti ricoperti con tegole o altri materiali di copertura discontinua) senza rivestimento con feltro o assito	1,0
- altro tetto non isolato	0,9
- tetto isolato	0,7
Aree interne di circolazione (senza muri esterni e con tasso di ricambio d'aria minore di $0,5 \text{ h}^{-1}$ )	0,0
Aree interne di circolazione liberamente ventilate (rapporto tra l'area delle aperture e volume dell'ambiente maggiore di $0,005 \text{ m}^2/\text{m}^3$ )	1,0

La norma definisce una serie di locali non climatizzati standard di cui riporta il valore medio annuale del fattore di correzione.

Va sottolineato che il calcolo mediante i coefficienti  $b_{tr,x}$  consigliati dalla norma conduce a errori sostanziali soprattutto per i locali non climatizzati esposti a forte radiazione solare. In questi locali, infatti, la temperatura può assumere facilmente valori esterni al range  $\theta_i - \theta_e$ , soprattutto nel periodo estivo. Questo sistema è quindi valido solo per un'analisi di massima di locali non molto irraggiati.

### 3. SPAZI NON CLIMATIZZATI SOLEGGIATI (in particolare SERRE e SOTTOTETTI)

Il comportamento degli spazi non riscaldati esposti al sole è complesso in quanto i diversi fenomeni di trasmissione del calore non possono essere facilmente scissi ed influiscono congiuntamente alla determinazione del carico termico per gli ambienti interni.

Per il software Archi-Energy è stato implementato un modello di calcolo alternativo rispetto alla norma, in grado di fornire risultati più accurati. Il modello è descritto dettagliatamente al paragrafo 2.11.

Si riporta di seguito solo l'espressione ultima del fattore  $b_{tr,x}$  risultante dal modello:

$$b_{tr} = \frac{H_{T,con\_spazio\_nn\_risc}}{H_{T,senza\_spazio\_nn\_risc}} = \left( \frac{1}{\frac{R_{V,e} R_E}{R_{V,e} + R_E} + \frac{R_{O,I} R_P}{R_{O,I} + R_P}} \right) \frac{R_{V,i}}{R_{V,i} + R_P} \frac{1}{\sum_i A_i U_i} \quad [2.5-5]$$

Il significato dei simboli può essere consultato al paragrafo 2.11.

### 2.5.4 Extra flusso per radiazione infrarossa verso al volta celeste

L'extra-flusso viene definito come il flusso di calore dovuto allo scambio radiativo infrarosso tra le superfici esterne dell'edificio e la volta celeste.

Il calcolo adottato segue fedelmente quello della norma UNI TS 11300 -1 (paragrafo 11.4) riportato qui di seguito:

$$\sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \quad [2.5-6]$$

dove:

$F_{r,k}$  = Fattore di forma tra il componente k-esimo e la volta celeste.

$\Phi_{r,mn,k}$  = Extra flusso del componente k-esimo.

A loro volta:

$$F_r = F_{sh,ob,dif} (1 + \cos S) / 2 \quad [2.5-7]$$

dove:

$F_{sh,ob,dif}$  = Fattore di shading del componente edilizio rispetto alla radiazione diffusa.

$S$  = Angolo di inclinazione del componente rispetto al piano orizzontale.

$$\Phi_r = R_{se} U_C A_C h_r \Delta\theta_{er} \quad [2.5-7]$$

dove:

$R_{se}$  = Resistenza superficiale esterna  $\left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$ .

$U_C$  = Trasmittanza termica  $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ .

$A_C$  = Area del componente edilizio [ $m^2$ ].

$h_r$  = Fattore di scambio termico per irraggiamento  $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ . La norma consiglia di

valutarlo in base alla seguente espressione:  $h_r = 5\varepsilon$ . Ossia 5 volte il valore dell'emissività esterna del componente edilizio.

$\Delta\theta_{er}$  = Differenza di temperatura tra l'aria esterna e la temperatura apparente del cielo. La norma consiglia un valore costante di 11K.

## 2.6 Scambio termico per ventilazione invernale

Lo scambio termico per ventilazione viene modellato sempre su base mensile e si compone dello scambio termico verso l'aria esterna e verso spazi non climatizzati.

Il software Archi-Energy fornisce, anche in questo caso, due calcoli differenti: quello conforme alla normativa UNI TS 11300 e quello alternativo sviluppato nella presente tesi.

### 2.6.1 Equazione generale dello scambio termico per ventilazione invernale con metodo normativo

La norma UNI TS 11300-1 5.2 definisce la seguente equazione generale per lo scambio termico per trasmissione:

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} (\theta_{H,i,set} - \theta_e) t_H \quad [2.6-1]$$

Nel software Archi-Energy tale relazione è stata adattata per tenere in considerazione i diversi livelli di ventilazione relativi ai diversi set-point impostabili. Quindi, senza alterarne il senso originario, la relazione utilizzata è la seguente:

$$Q_{H,ve,cont} = Q_{H,ve,set1} + Q_{H,ve,set2} \quad [2.6-2]$$

dove:

$$Q_{H,ve,set1} = H_{ve,adj,set1} (\theta_{H,i,set1} - \theta_e) t_{H,1} \quad [2.6-3]$$

$$Q_{H,ve,set2} = H_{ve,adj,set2} (\theta_{H,i,set1} - \theta_e) t_{H,2} \quad [2.6-4]$$

Il significato dei simboli è il seguente:

$Q_{H,ve,cont}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento continuo dell'impianto di riscaldamento. Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{H,ve,set1}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni (positivo = uscente) durante le ore di attività. Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{H,ve,set2}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni (positivo = uscente) durante le ore di non attività. Il risultato è espresso in *kWh*.

$H_{ve,adj,set1}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di attività, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$H_{ve,adj,set2}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di non attività, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$\theta_{H,int,set1}$  = Temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata (sempre set-point 1, in quanto il riscaldamento è continuo).

$\theta_e$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno (da norma UNI 10349).

Il modello calcola lo scambio termico per ventilazione considerando una temperatura interna fissa a set-point 1, una temperatura esterna media mensile fissa, ma una portata di ventilazione variabile nei periodi di attività (es. ore diurne) e quelli di inattività (le altre ore). Ciò è possibile senza alterare il senso del modello normativo in quanto la dinamica della ventilazione non è soggetta ad inerzie rilevanti. Il calcolo dei diversi coefficienti di scambio termico verrà illustrato nei paragrafi riguardanti i parametri di ventilazione.

### 2.6.2 Equazione generale dello scambio termico per ventilazione invernale con metodo alternativo

L'approccio alternativo, come sottolineato ampiamente al paragrafo 2.1.2, fornisce una metodologia di calcolo che abbatte i vincoli di "riscaldamento continuo" e di "temperatura esterna costante". Ne consegue che l'equazione generale dello scambio termico per ventilazione assume una forma diversa dal metodo normativo:

$$Q_{H,ve,disc} = Q_{H,ve,set1} + Q_{H,ve,set2} + Q_{H,ve,restart} \quad [2.6-5]$$

dove:

$Q_{H,ve,disc}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento discontinuo dell'impianto di riscaldamento. Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{H,ve,set1}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni durante le ore di attività della struttura, ossia nei periodi in cui l'impianto di riscaldamento si trova tarato a set-point 1.

$Q_{H,ve,set2,f}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni durante le ore di non attività della struttura durante i giorni di funzionamento (es. ore notturne), quando l'impianto di riscaldamento si trova tarato a set-point 2.

$Q_{H,ve,set2,nf}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni durante i giorni di non funzionamento (es. weekend, chiusure, ecc), quando l'impianto di riscaldamento si trova tarato a set-point 2.

$Q_{H,ve,restart}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo a set-point ridotto oppure un periodo di spegnimento totale dell'impianto.

Più nello specifico vengono riportate le relazioni che esplicitano i singoli componenti della 2.6-2 che parteciperanno direttamente ai bilanci termici di cui alle formule 2.1-7 e 2.1-8:

$$Q_{H,ve,set1} = H_{ve,adj,set1} (\theta_{H,i,set1} - \theta_{e,mean,1}) t_{H,1} \quad [2.6-6]$$

$$Q_{H,ve,set2,f} = H_{ve,adj,set2} (\theta_{H,i,set2} - \theta_{e,mean,2f}) t_{H,2,on,f} \quad [2.6-7]$$

$$Q_{H,ve,set2,nf} = H_{ve,adj,set2} (\theta_{H,i,set2} - \theta_{e,mean}) t_{H,2,nf} \quad [2.6-8]$$

$$Q_{H,ve,restart} = Q_{H,ve,restart,day} (N_{days,f} - N_{days,nf}) + Q_{H,ve,restart,max} N_{days,nf} \quad [2.6-9]$$

dove:

$H_{ve,adj,set1}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di attività, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$H_{ve,adj,set2}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di non attività, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$\theta_{H,i,set1}$  = Temperatura interna di regolazione (set-point 1) per il riscaldamento della zona considerata durante le ore di attività.

$\theta_{H,i,set2}$  = Temperatura interna di regolazione (set-point 2) per il riscaldamento della zona considerata durante le ore di non attività (stesso valore sia per le ore di inattività notturna, che per quelle dei giorni di chiusura).

$\theta_{e,mean} = \theta_{e,mean,2,nf}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle 24 ore.

$\theta_{e,mean,1}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle ore di attività, cioè sulle ore in cui l'impianto si trova a set-point 1.



$\theta_{e,mean,2,f}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle ore di non attività dei giorni di funzionamento, cioè sulle ore di interruzione breve giornaliera (per es. notturna) in cui l'impianto si trova a set-point 2.

$t_{H,1}$  = Somma mensile delle ore di attività (totale ore a set-point 1).

$t_{H,2}$  = Somma mensile delle ore di non attività (totale ore a set-point 2).

$t_{H,2,f}$  = Somma mensile delle ore complessive di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di riscaldamento è esercito a set-point 2.

$t_{H,2,on,f}$  = Somma mensile delle ore di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di riscaldamento è effettivamente acceso. Questo tempo non coincide con l'intero periodo notturno poiché prima dell'attivazione dell'impianto occorre che la temperatura interna scenda sotto al set-point 2 ( $\theta_{H,i,set2}$ ), perciò dipende dalla costante di tempo di raffreddamento dell'edificio e dalla temperatura esterna. Il calcolo di  $t_{H,2,on,f}$  verrà approfondito più avanti.

$t_{H,2,nf}$  = Somma mensile delle ore di non attività dei giorni di non funzionamento (es. ore del weekend o dei periodi di chiusura aziendale) in cui l'impianto di riscaldamento è esercito a set-point 2.

$Q_{H,ve,restart,day}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di interruzione breve a set-point 2 (es. attenuazione notturna).

$Q_{H,ve,restart,max}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di interruzione lunga a set-point 2 (es. weekend).

$N_{days,f}$  = Numero di giorni di funzionamento (almeno un'ora di attività).

$N_{days,nf}$  = Numero di giorni di non funzionamento (nessuna ora di attività).

Il calcolo del calore dovuto al *restart* è identico a quello già descritto al paragrafo 2.3.2, l'unica differenza è che questa volta dal valore globale del *restart* viene isolata la quota dovuta alla sola ventilazione moltiplicandolo per il rapporto tra il coefficiente di scambio termico per ventilazione e quello globale.

$$Q_{H,ve, restart, day} = C_{mean} (\theta_{H,i, set1} - \theta_{H,i, end-t2f}) \frac{H_{ve, adj, set2}}{H_{tr, adj} + H_{ve, adj, set2}} \quad [2.3-5]$$

$$Q_{H,ve, restart, max} = C_{mean} (\theta_{H,i, set1} - \max(\theta_{e, mean}; \theta_{H,i, set2})) \frac{H_{ve, adj, set2}}{H_{tr, adj} + H_{ve, adj, set2}} \quad [2.3-6]$$

$C_{mean}$  = Capacità termica media dell'edificio [kWh/K]

$H_{tr, adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

$H_{ve, adj, set2}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di non attività, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

Da quanto detto, il calcolo più complesso riguarda la temperatura di fine interruzione  $\theta_{H,i, end-t2f}$  e il tempo effettivo in cui il riscaldamento rimane acceso a set-point 2  $t_{H,2, on, f}$ . Il calcolo di tale temperatura è identico a quanto già scritto nel paragrafo 2.3 relativo allo scambio termico per trasmissione perciò si rimanda quindi a tale trattazione.

## 2.7 Scambio termico per ventilazione estivo

Come per lo scambio termico per ventilazione invernale, esso viene modellato su base mensile e si compone dello scambio termico verso l'aria esterna e di quello verso spazi non climatizzati.

Il software Archi-Energy fornisce, anche in questo caso, due calcoli differenti: quello conforme alla normativa UNI TS 11300 e quello alternativo sviluppato nella presente tesi.

### 2.7.1 Equazione generale dello scambio termico per ventilazione estivo con metodo normativo

La norma UNI TS 11300-1 5.2 definisce la seguente equazione generale per lo scambio termico per ventilazione invernale:

$$Q_{C,ve} = H_{ve,adj} (\theta_{C,i,set} - \theta_e) \tau_C \quad [2.7-1]$$

Nel software Archi-Energy tale relazione è stata adattata per tenere in considerazione i diversi livelli di ventilazione relativi ai diversi set-point impostabili. Quindi, senza alterarne il senso originario, la relazione utilizzata è la seguente:

$$Q_{C,ve,cont} = Q_{C,ve,set1} + Q_{C,ve,set2} + Q_{C,ve,freecool} \quad [2.7-2]$$

dove:

$$Q_{C,ve,set1} = H_{ve,adj,set1} (\theta_{C,i,set1} - \theta_e) \tau_{C,1} \quad [2.7-3]$$

$$Q_{C,ve,set2} = H_{ve,adj,set2} (\theta_{C,i,set1} - \theta_e) \tau_{2,nf} \quad [2.7-4]$$

$$Q_{C,ve,freecool} = H_{ve,adj,freecool} (\theta_{C,i,set1} - \theta_e) \tau_{2,f} \quad [2.7-5]$$

Il significato dei simboli è il seguente:

$Q_{C,ve,cont}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento continuo dell'impianto di raffrescamento. Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{C,ve,set1}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) durante le ore di attività. Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{C,ve,set2}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) durante le ore di non attività dei giorni di non funzionamento (es giorni di chiusura). Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{C,ve,freecool}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) durante le ore di non attività dei giorni di funzionamento (tipicamente le ore notturne in cui è attiva la ventilazione *free-cooling*). Il risultato è espresso in *kWh*.

$H_{ve,adj,set1}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di attività, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$H_{ve,adj,set2}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le 24 ore del giorno di non funzionamento (es. weekend), corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$H_{ve,adj,freecool}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne), corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$\theta_{C,i,set1}$  = Temperatura interna di regolazione per il raffrescamento della zona considerata (sempre set-point 1, in quanto il raffrescamento è continuo).

$\theta_e$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno (da norma UNI 10349).

Il modello calcola lo scambio termico per ventilazione considerando una temperatura interna fissa a set-point 1, una temperatura esterna media mensile fissa, ma una portata di ventilazione variabile nei periodi di attività (es. ore diurne), nei periodi di inattività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) e per le 24 ore dei giorni di non funzionamento (le altre ore). Ciò è possibile senza alterare il senso del modello normativo in quanto la dinamica della ventilazione non è soggetta ad inerzie rilevanti.

Il calcolo dei diversi coefficienti di scambio termico verrà illustrato nei paragrafi riguardanti i parametri di ventilazione.

### 2.7.2 Equazione generale dello scambio termico per ventilazione estivo con metodo alternativo

L'approccio alternativo, come sottolineato ampiamente al paragrafo 2.1.2, fornisce una metodologia di calcolo che abbatte i vincoli di "raffrescamento continuo" e di "temperatura esterna costante". Ne consegue che l'equazione generale dello scambio termico per ventilazione assume una forma diversa dal metodo normativo:

$$Q_{C,ve,disc} = Q_{C,ve,set1} + Q_{C,ve,restart} \quad [2.7-6]$$

dove:

$Q_{C,ve,disc}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento discontinuo dell'impianto di raffrescamento. Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{C,ve,set1}$  = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) durante le ore di attività. Il risultato è espresso in *kWh*.

$Q_{C,ve,restart}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di spegnimento dell'impianto.

Più nello specifico vengono riportate le relazioni che esplicitano i singoli componenti della 2.7-6 che parteciperanno direttamente ai bilanci termici di cui alle formule 2.1-7 e 2.1-8:

$$Q_{C,ve,set1} = H_{ve,adj,set1} (\theta_{C,i,set1} - \theta_{e,mean,1}) t_{C,1} \quad [2.7-7]$$

$$Q_{C,ve,restart} = Q_{C,ve,restart,day} (N_{days,f} - N_{days,nf}) + Q_{C,ve,restart,max} N_{days,nf} \quad [2.7-8]$$

dove:

$H_{ve,adj,set1}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di attività, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$\theta_{C,t,set1}$  = Temperatura interna di regolazione (set-point 1) per il raffrescamento della zona considerata durante le ore di attività.

$\theta_{e,mean,1}$  = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno calcolata sulle ore di attività, cioè sulle ore in cui l'impianto si trova a set-point 1.

$t_{C,1}$  = Somma mensile delle ore di attività (totale ore a set-point 1).

$Q_{C,ve,restart,day}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di interruzione breve a set-point 2 (es. attenuazione notturna).

$Q_{C,ve,restart,max}$  = Flusso di calore necessario per riportare la temperatura interna dell'edificio al set-point 1 in conseguenza di un periodo di interruzione lunga a set-point 2 (es. weekend).

$N_{days,f}$  = Numero di giorni di funzionamento (almeno un'ora di attività).

$N_{days,nf}$  = Numero di giorni di non funzionamento (nessuna ora di attività).

Il calcolo del calore dovuto al *restart* è identico a quello già descritto al paragrafo 2.3.2, l'unica differenza è che questa volta dal valore globale del *restart* viene isolata la quota dovuta alla sola ventilazione moltiplicandolo per il rapporto tra il coefficiente di scambio termico per ventilazione e quello globale.

$$Q_{C,tr, restart, day} = C_{mean} (\theta_{C,i, set1} - \theta_{C,i, end-t2f}) \frac{H_{ve, adj, freecool}}{H_{tr, adj} + H_{ve, adj, freecool}} \quad [2.7-9]$$

$$Q_{C,tr, restart, max} = C_{mean} (\theta_{C,i, set1} - \theta_{e, mean}) \frac{H_{ve, adj, set2}}{H_{tr, adj} + H_{ve, adj, set2}} \quad [2.7-10]$$

$C_{mean}$  = Capacità termica media dell'edificio [kWh/K]

$H_{tr, adj}$  = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

$H_{ve, adj, set1}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di attività, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$H_{ve, adj, set2}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le 24 ore del giorno di non funzionamento (es. weekend), corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

$H_{ve, adj, freecool}$  = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata durante le ore di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne), corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

Da quanto detto, il calcolo più complesso riguarda la temperatura di fine interruzione  $\theta_{C,i, end-t2f}$ . A tal fine si rimanda alle considerazioni già fatte nel paragrafo 2.3.2.



## 2.8 Coefficienti di scambio termico per ventilazione

Gli scambi per ventilazione, descritti nei paragrafi 2.6 e 2.7, si basano sulla conoscenza dei coefficienti di scambio termico per ventilazione dei vari componenti dell'edificio. Essi definiscono la tendenza dell'aria dell'edificio a scambiare calore in presenza di una portata di aria di rinnovo esterna e di una differenza di temperatura tra interno ed esterno.

Il software Archi-Energy fornisce in questo caso un solo calcolo, conforme alla norma UNI TS 11300-1, sia per il metodo normativo che per quello alternativo. L'unica differenza riguarda l'implementazione di un modello matematico innovativo per ciò che concerne gli scambi termici con spazi non climatizzati in cui vi sia apporto solare (es. serre, sottotetti, ambienti soleggiati, ecc).

### 2.8.1 Coefficiente di scambio termico per ventilazione con l'aria esterna

Si riporta la formula generale descritta dalla norma ISO 13790 9.3.1, adattata e differenziata per la stagione invernale ed estiva nonché per le differenti portate di ventilazione impostate nel calcolo:

#### STAGIONE INVERNALE:

$$H_{H,ve,adj,e,set1} = \rho_a c_a b_{ve,e} q_{H,ve,e,set1} \quad [2.8-1]$$

$$H_{H,ve,adj,e,set2} = \rho_a c_a b_{ve,e} q_{H,ve,e,set2} \quad [2.8-2]$$

#### STAGIONE ESTIVA:

$$H_{C,ve,adj,e,set1} = \rho_a c_a b_{ve,e} q_{C,ve,e,set1} \quad [2.8-3]$$

$$H_{C,ve,adj,e,set2} = \rho_a c_a b_{ve,e} q_{C,ve,e,set2} \quad [2.8-4]$$

$$H_{C,ve,adj,e,freecool} = \rho_a c_a b_{ve,e} q_{C,ve,freecool} \quad [2.8-5]$$

dove:

$$\rho_a = \text{Densità volumica dell'aria} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right].$$

$$c_a = \text{Calore specifico a pressione costante dell'aria} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right].$$

$b_{ve,e}$  = Fattore di correzione della temperatura dell'aria esterna. Tale valore è diverso da 1 nel caso in cui l'aria di ventilazione sia per qualche ragione a temperatura diversa da quella dell'aria esterna, per esempio mediante l'introduzione di recuperatori di calore.

$$q_{H,ve,e,set1} = \text{Portata d'aria di ventilazione a set-point 1 nella stagione invernale} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right].$$

$$q_{H,ve,e,set2} = \text{Portata d'aria di ventilazione a set-point 2 nella stagione invernale} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right].$$

$$q_{C,ve,e,set1} = \text{Portata d'aria di ventilazione a set-point 1 nella stagione estiva} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right].$$

$$q_{C,ve,e,set2} = \text{Portata d'aria di ventilazione a set-point 2 nella stagione estiva} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right].$$

$$q_{C,ve,freecool} = \text{Portata d'aria di ventilazione a set-point di } free\text{-cooling} \text{ nella stagione estiva} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right].$$

I periodi in cui sono attivi i vari set-point sono esplicitati nel paragrafo 2.1.2

### 2.8.2 Coefficiente di scambio termico per ventilazione con spazi non climatizzati

Nell'implementazione del software Archi-Energy si è data molta importanza alla modellazione accurata degli spazi non climatizzati. La trattazione che riguarda questi spazi è svolta integralmente nel paragrafo 2.11, si riportano qui solo le equazioni che riguardano la ventilazione.

Si riporta la formula generale descritta dalla norma ISO 13790 9.3.1, adattata e differenziata per la stagione invernale ed estiva nonché per le differenti portate di ventilazione impostate nel calcolo:

#### STAGIONE INVERNALE:

$$H_{H,ve,adj,u,set1} = \rho_a c_a b_{ve,u} q_{H,ve,u,set1} \quad [2.8-6]$$

$$H_{H,ve,adj,u,set2} = \rho_a c_a b_{ve,u} q_{H,ve,u,set2} \quad [2.8-7]$$

#### STAGIONE ESTIVA:

$$H_{C,ve,adj,u,set1} = \rho_a c_a b_{ve,u} q_{C,ve,u,set1} \quad [2.8-8]$$

$$H_{C,ve,adj,u,set2} = \rho_a c_a b_{ve,u} q_{C,ve,u,set2} \quad [2.8-9]$$

dove:

$$\rho_a = \text{Densità volumica dell'aria} \left[ \frac{kg}{m^3} \right].$$

$$c_a = \text{Calore specifico a pressione costante dell'aria} \left[ \frac{kWh}{kg} \right].$$

$b_{ve,u}$  = Fattore di correzione della temperatura dell'aria proveniente dagli spazi non climatizzati.

$q_{H,ve,e,set1}$  = Portata d'aria di ventilazione a set-point 1 nella stagione invernale  $\left[ \frac{m^3}{h} \right]$ .

$q_{H,ve,e,set2}$  = Portata d'aria di ventilazione a set-point 2 nella stagione invernale  $\left[ \frac{m^3}{h} \right]$ .

$q_{C,ve,e,set1}$  = Portata d'aria di ventilazione a set-point 1 nella stagione estiva  $\left[ \frac{m^3}{h} \right]$ .

$q_{C,ve,e,set2}$  = Portata d'aria di ventilazione a set-point 2 nella stagione estiva  $\left[ \frac{m^3}{h} \right]$ .

I periodi in cui sono attivi i vari set-point sono esplicitati nel paragrafo 2.1.

Si può notare che per i locali non climatizzati non viene presa in considerazione la possibilità di *free-cooling* e quindi anche nelle ore notturne si applica il set-point 2.

Il punto più delicato del modello è chiaramente il calcolo del coefficiente  $b_{ve,u}$ . Analogamente a quanto detto per la trasmissione, il software Archi-Energy propone le tre differenti metodologie di calcolo che seguono:

1. SPAZI A TEMPERATURA FISSA.
2. SPAZI NON CLIMATIZZATI STANDARD.
3. SPAZI NON CLIMATIZZATI SOLEGGIATI (in particolare SERRE e SOTTOTETTI).

### 1. SPAZI A TEMPERATURA FISSA

Questo modello si adatta bene agli spazi che vengono mantenuti costantemente ad una temperatura prefissata. Locali di questo tipo sono ad esempio spazi adiacenti riscaldati a temperatura diversa da quella della zona termica esaminata.

In questi spazi il coefficiente  $b_{ve,u}$  è calcolato come segue:

$$b_{ve,u} = \frac{\theta_u - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad [2.8-10]$$

Si tratta quindi di una semplice scalatura del  $\Delta\theta$  interno-esterno in modo proporzionale al  $\Delta\theta$  interno-locale non climatizzato.

### 2. SPAZI NON CLIMATIZZATI STANDARD

Questo modello riprende le indicazioni del prospetto 5 della norma UNI TS 11300-1, che riporta i valori consigliati del fattore di correzione  $b_{ve,u} = b_{tr,x}$ . La tabella è consultabile nel paragrafo relativo a serre e sottotetti.

### 3. SPAZI NON CLIMATIZZATI SOLEGGIATI (in particolare SERRE e SOTTOTETTI)

Il comportamento degli spazi non riscaldati esposti al sole è complesso in quanto i diversi fenomeni di trasmissione del calore non possono essere facilmente scissi ed influiscono congiuntamente alla determinazione del carico termico per gli ambienti interni.

Per il software Archi-Energy è stato implementato un modello di calcolo alternativo rispetto alla norma, in grado di fornire risultati più accurati. Il modello è descritto dettagliatamente al paragrafo 2.11.

Si riporta di seguito solo l'espressione ultima del fattore  $b_{ve,u}$  risultante dal modello:

$$b_{ve,u} = \frac{H_{V,con\_spazio\_nn\_risc}}{H_{V,senza\_spazio\_nn\_risc}} = \left( \frac{1}{\frac{R_{V,e} R_E}{R_{V,e} + R_E} + \frac{R_{O,I} R_P}{R_{O,I} + R_P}} \right) \frac{R_P}{R_{V,i} + R_P} \frac{1}{\rho_a c_a q_{ve,u,set1}} \quad [2.8-11]$$

Il significato dei simboli può essere consultato al paragrafo 2.11.

## 2.9 Apporti interni

Riguardo ai carichi interni il software Archi-Energy utilizza una modellazione simile a quella della norma UNI TS 11300 -1, con la sola differenza che l'utente può impostare due livelli di carichi termici. Il primo livello coincide si applica ore di attività della struttura, il secondo di applica alle altre ore. Però, per permettere di eseguire correttamente il bilancio termico del paragrafo 2.1 i carichi vengono suddivisi in tre periodi e ne risultano le seguenti equazioni:

$$Q_{\text{int}} = Q_{\text{int, set1}} + Q_{\text{int, set2, f}} + Q_{\text{int, set2, nf}} \quad [2.9-1]$$

dove:

$$Q_{\text{int, set1}} = \Phi_{\text{int, set1}} t_1 \quad [2.9-2]$$

$$Q_{\text{int, set2, f}} = \Phi_{\text{int, set2}} t_{2, f} \quad [2.9-3]$$

$$Q_{\text{int, set2, nf}} = \Phi_{\text{int, set2}} t_{2, nf} \quad [2.9-4]$$

Il significato dei simboli è il seguente:

$Q_{\text{int}}$  = Carico termico complessivo mensile dovuto agli apporti interni [W].

$Q_{\text{int, set1}}$  = Carico termico mensile dovuto agli apporti interni nelle ore di attività in cui è attivo il set-point1 [W].

$Q_{\text{int, set2, f}}$  = Carico termico mensile dovuto agli apporti interni nelle ore di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne), in cui è attivo il set-point2 [W].

$Q_{\text{int, set2, nf}}$  = Carico termico mensile dovuto agli apporti interni nelle 24 ore dei giorni di non funzionamento (es. weekend), in cui è attivo il set-point2 [W].

$\Phi_{\text{int, set1}}$  = Flusso termico interno a set-point 1

$\Phi_{\text{int, set2}}$  = Flusso termico interno a set-point 2

$t_{H,1}$  = Somma mensile delle ore di attività (totale ore a set-point 1).

$t_{H,2}$  = Somma mensile delle ore di non attività (totale ore a set-point 2).

$t_{H,2,f}$  = Somma mensile delle ore complessive di non attività dei giorni di funzionamento (es. ore notturne) in cui l'impianto di riscaldamento è esercito a set-point 2.

$t_{H,2,nf}$  = Somma mensile delle ore di non attività dei giorni di non funzionamento (es. ore del weekend o dei periodi di chiusura aziendale) in cui l'impianto di riscaldamento è esercito a set-point 2.



## 2.10 Apporti solari

Riguardo agli apporti solari il software Archi-Energy utilizza una modellazione simile a quella della norma UNI TS 11300 -1, con alcune differenze solo per ciò che concerne il calcolo degli apporti da locali non climatizzati soleggiati (Ved. Par. 2.11).

Gli apporti solari complessivi sono la somma di quelli provenienti da pareti opache, quelli da pareti trasparenti e quelli da spazi non climatizzati secondo le seguenti relazioni:

$$Q_{sol} = \sum_k \Phi_{sol,mn,k} t = Q_{sol,c} + Q_{sol,g} + Q_{sol,u,tot} \quad [2.10-1]$$

Vi sono quindi tre relazioni diverse per i diversi apporti.

### PARETI OPACHE CONFINANTI CON L'ESTERNO:

L'apporto termico della singola parete opaca si esprime come segue:

$$Q_{sol,c} = F_{sh,c} \alpha_{sol,c} R_{se} U_c A_c I_{sol,p} \quad [2.10-2]$$

dove:

$F_{sh,c}$  = Fattore di ombreggiamento (*shadow*) della parete opaca, calcolato come l'area mediamente ombreggiata rispetto a quella non ombreggiata.

$\alpha_{sol,c}$  = Assorbività media delle superfici esterne della parete opaca.

$R_{se}$  = Resistenza termica superficiale esterna.

$U_c$  = Trasmittanza termica della parete opaca.

$A_c$  = Area della parete opaca.

$I_{sol,p}$  = Irraggiamento solare proiettato incidente sulla parete opaca [W/m<sup>2</sup>].

Il calcolo della 2.10-2 deve essere ripetuto per ogni parete opaca esterna.

PARETI TRASPARENTI CONFINANTI CON L'ESTERNO:

L'apporto termico della singola parete trasparente si esprime come segue:

$$Q_{sol,g} = F_{sh,g} (1 - F_{F,w}) g_g A_w I_{sol,p} \quad [2.10-3]$$

dove:

$F_{sh,g}$  = Fattore di ombreggiamento (*shadow*) della parete vetrata, calcolato come l'area mediamente ombreggiata rispetto a quella non ombreggiata.

$F_{F,w}$  = Fattore di telaio della vetrata (superficie di telaio su superficie trasparente).

$g_g$  = Trasmittanza solare della superficie trasparente.

$A_w$  = Area lorda della parete vetrata.

$I_{sol,p}$  = Irraggiamento solare proiettato incidente sulla parete vetrata [ $W/m^2$ ]. I valori, divisi per latitudine ed esposizione, sono quelli forniti dalla norma UNI 10349.

Il calcolo della 2.10-3 deve essere ripetuto per ogni parete trasparente esterna.

PARETI OPACHE E TRASPARENTI CONFINANTI CON SPAZI NON CLIMATIZZATI:

L'apporto termico dipende dal tipo di locale non climatizzato. Per locali a temperatura fissa e locali standard si considera che l'irraggiamento è pari a zero. Al contrario, per i locali modellati secondo la metodologia alternativa di cui al paragrafo 2.11, valgono le seguenti espressioni:

$$Q_{sol,u,tot} = Q_{\Phi_{TT}} + Q_{\Phi_O} + Q_{\Phi_{TO,i}} + Q_{\Phi_{TO,e}} \quad [2.10-4]$$

L'esplicitazione dei componenti della 2.10-4 è riportata al paragrafo 2.11.

## **2.11 Modello di calcolo specifico per serre e sottotetti**

### **2.11.1 Descrizione del modello di calcolo**

Nell'implementazione del software Archi-Energy si è data molta importanza alla modellazione accurata degli spazi non climatizzati. Infatti essi possono costituire una soluzione interessante ai fini del contenimento dei consumi. Ad esempio molte amministrazioni locali stanno inserendo le serre come elemento premiante nell'ottenimento di benefici edilizi, ad esempio quelli legati al Piano Casa.

La valutazione degli scambi termici verso spazi non climatizzati esposti al sole è una problematica fisica complessa. L'irraggiamento solare interagisce in vario modo con i componenti opachi e trasparenti dello spazio e induce carichi termici sia per irraggiamento diretto che indirettamente mediante trasmissione e ventilazione attraverso le pareti di confine.

L'attuale normativa, per contro, è assai vaga e carente sulla modellazione di tali spazi. La norma UNI TS 11300-1 11.2 li considera semplicemente mediante un coefficiente correttivo nello scambio termico per trasmissione. La norma ISO 13790 (paragrafo 8.3.2 e Allegato E) fornisce una metodologia più scientifica, ma sempre molto semplificata, per approcciare al fenomeno.

Per questi motivi si è deciso di sviluppare una metodologia alternativa, sviluppata mediante l'elaborazione di una rete elettrica equivalente, atta a rappresentare tutti gli scambi termici che avvengono tra l'ambiente interno e l'esterno quando vi è interposto un locale privo di condizionamento ma irraggiato dal sole.

Nella rete elettrica sono state adottate le seguenti equivalenze:

- Le differenze di temperatura si considerano differenze di potenziale.
- I flussi di calore si considerano correnti elettriche.
- Le resistenze e conduttanze termiche diventano resistenze e conduttanze elettriche.

In base a tali equivalenze è stata realizzata la rete equivalente di Fig. 2.11.1

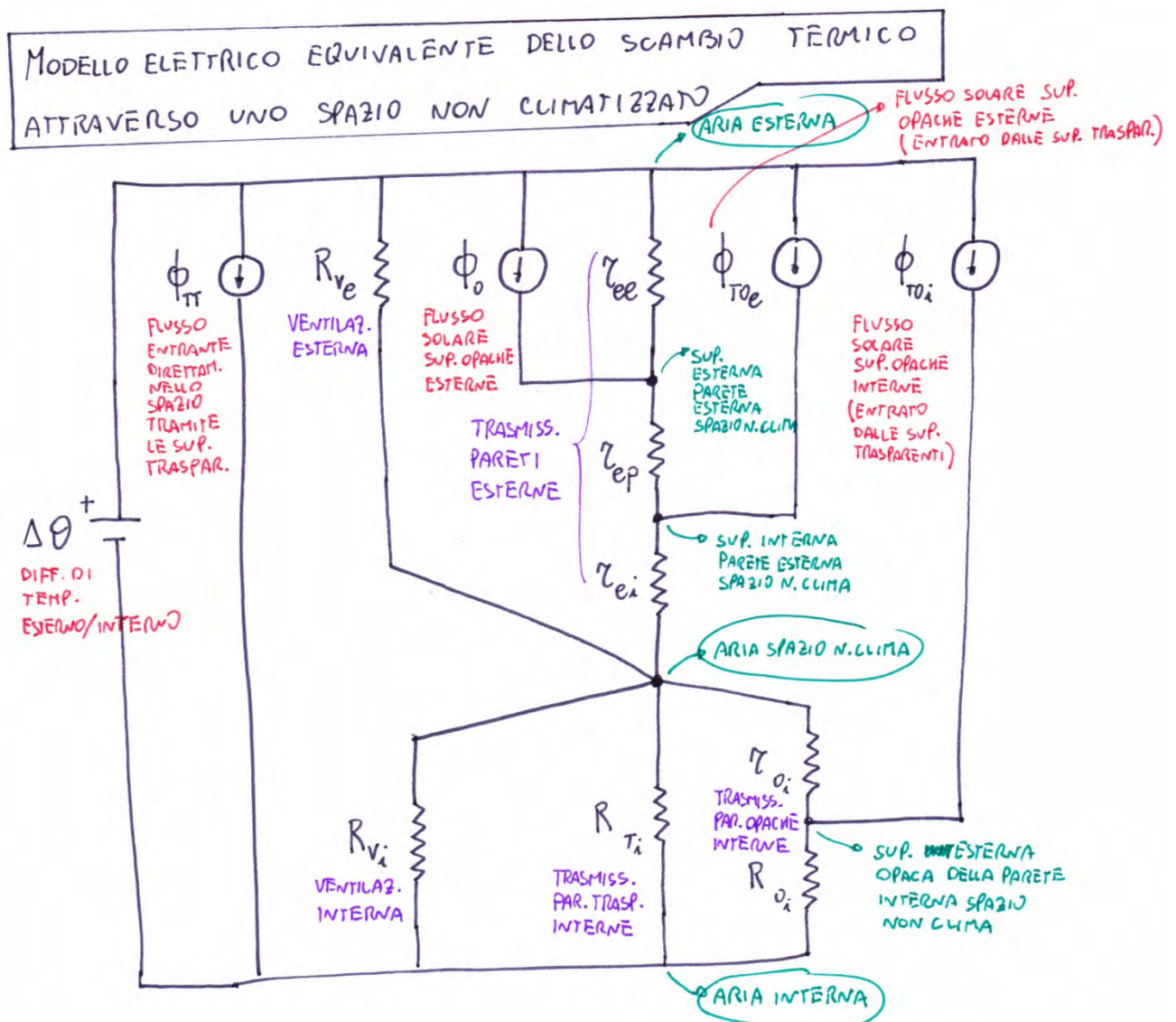


Fig. 2.11.1. Rappresentazione grafica del modello elettrico equivalente utilizzato per il calcolo dello scambio termico con spazi non climatizzati.

Nella costruzione del modello si sono individuati i seguenti **generatori**:

- $\Delta\theta_{i,e}$  = Differenza di temperatura tra l'aria interna e l'aria esterna. Essa agisce quindi tra il nodo "aria esterna" e quello "aria interna".
- $\Phi_{TT}$  = Flusso di calore dovuto all'irraggiamento solare incidente sulle superfici esterne trasparenti, entrante nello spazio attraverso di esse, poi incidente su quelle interne trasparenti (da qui "TT") e da esse entrante direttamente nei locali climatizzati.
- $\Phi_O$  = Flusso di calore dovuto all'irraggiamento solare incidente sulle superfici esterne opache (da qui "O") e da esse assorbito.
- $\Phi_{TO,e}$  = Flusso di calore dovuto all'irraggiamento solare incidente sulle superfici esterne trasparenti, entrante nello spazio attraverso di esse, poi incidente su quelle interne opache (ma confinanti con lo spazio esterno, da qui "TO,e") e da esse in parte assorbito ed in parte riflesso.
- $\Phi_{TO,i}$  = Flusso di calore dovuto all'irraggiamento solare incidente sulle superfici esterne trasparenti, entrante nello spazio attraverso di esse, poi incidente su quelle interne opache (confinanti con lo spazio interno, da qui "TO,i") e da esse in parte assorbito ed in parte riflesso.

Le espressioni analitiche delle grandezze di cui sopra sono riportate qui di seguito:

$$\Phi_{TT} = F_{sh,med} g_e g_i \left( \frac{A_{T,i}}{A_{tot,i}} \right) A_{T,e,front} \Phi_{sol,front} + (1 - \alpha_{med,spazio}) g_i \left( \frac{A_{T,i}}{A_{tot,spazio}} \right) \Phi_{sol,TO} \quad [2.11-1]$$

dove:

$$\Phi_{sol,TO,e} = F_{sh,med} g_e \left( \frac{A_{O,spazio}}{A_{tot,spazio}} \right) \left( \sum_{sup.est} A_{T,e} \Phi_{sol} - A_{T,e,front} \Phi_{sol,front} \right) \quad [2.11-2]$$

$$\Phi_O = F_{sh,med} \alpha_{med,e} \sum_{sup.est} A_{O,e} \Phi_{sol} \quad [2.11-3]$$

$$\Phi_{TO,i} = F_{sh,med} g_e \left( \frac{A_{O,i}}{A_{tot,i}} \right) A_{T,e,front} \Phi_{sol,front} + \alpha_{med,i} (1 - \alpha_{med,spazio}) \left( \frac{A_{O,i}}{A_{tot,spazio}} \right) \Phi_{sol,TO,e} \quad [2.11-4]$$

$$\Phi_{TO,e} = \left( \alpha_{med,spazio} + (1 - \alpha_{med,spazio}) \frac{A_{O,e}}{A_{tot,spazio}} \right) \Phi_{sol,TO,e} \quad [2.11-5]$$

I simboli utilizzati hanno i seguenti significati:

$F_{sh,med}$  = Fattore di ombreggiamento (*shadow*) medio dello spazio non climatizzato, calcolato come l'area mediamente ombreggiata rispetto a quella non ombreggiata. Essendo un parametro molto variabile durante l'anno nel software è possibile inserire un valore estivo ed uno invernale.

$g_e$  = Trasmittanza solare media delle superfici trasparenti che delimitano lo spazio non climatizzato dall'esterno.

$g_i$  = Trasmittanza solare media delle superfici trasparenti che delimitano lo spazio non climatizzato dallo spazio interno.

$\alpha_{med,e}$  = Assorbività media delle superfici esterne dello spazio non climatizzato.

$\alpha_{med,spazio}$  = Assorbività media delle superfici interne allo spazio non climatizzato

$A_{T,i}$  = Area della superficie trasparente interna.

$A_{T,e}$  = Area della superficie trasparente esterna.

$A_{T,e,front}$  = Area della superficie trasparente esterna relativa alla faccia dello spazio non climatizzato che è parallela e frontale rispetto alla parete di separazione.

$A_{O,i}$  = Area della superficie opaca interna.

$A_{O,e}$  = Area della superficie opaca esterna.

$A_{O,spazio}$  = Area della superficie opaca che racchiude l'intero spazio non climatizzato.

$A_{tot,spazio}$  = Area della superficie che racchiude l'intero spazio non climatizzato.

$A_{tot,i}$  = Area totale della superficie di separazione tra lo spazio interno e quello non climatizzato.

$\Phi_{sol}$  = Flusso solare complessivo medio mensile incidente sulla superficie esterna dello spazio non climatizzato (su ogni faccia).

$\Phi_{sol,front}$  = Flusso solare medio mensile incidente sulla superficie esterna frontale dello spazio non climatizzato (sulla faccia parallela alla parete di separazione).

Come si può vedere dalla Fig. 2.11.1 i generatori sono collegati a nodi specifici della rete elettrica. Gli elementi passivi della rete sono costituiti dalle resistenze termiche per trasmissione dei vari componenti edilizi, dalle adduttanze superficiali e dalle resistenze termiche per ventilazione (sia interno-spazio che esterno-spazio).

Gli **elementi passivi** sono rappresentati da:

- $R_E = r_{ee} + r_{ep} + r_{ei}$  = Resistenza termica globale per trasmissione delle pareti opache e vetrate che delimitano lo spazio non climatizzato dall'esterno. Questa è pari alla somma della resistenza di adduzione esterna, della resistenza delle pareti e della resistenza di adduzione interna.
- $R_{O,I} = R_{O,i} + r_{O,i}$  = Resistenza termica globale per trasmissione delle pareti opache di confine tra la zona di calcolo e lo spazio non climatizzato. Questa è pari alla somma della resistenza di adduzione esterna e della resistenza delle pareti (già comprensiva anche della resistenza di adduzione interna).

- $R_{T,I}$  = Resistenza termica globale per trasmissione delle pareti trasparenti di confine tra la zona di calcolo e lo spazio non climatizzato.
- $R_{V,e}$  = Resistenza termica per ventilazione tra spazio non climatizzato ed esterno.
- $R_{V,i}$  = Resistenza termica per ventilazione tra spazio non climatizzato ed interno.

Ai fini del calcolo energetico le **grandezze di interesse** sulle quali risolvere la rete di Fig. 2.11.1 sono i flussi di calore scambiati con l'ambiente interno, ossia la somma dei flussi entranti nel nodo "aria interna":

$$Q_{u,tot} = Q_{\Delta\theta_{i,e}} + Q_{\Phi_{TT}} + Q_{\Phi_O} + Q_{\Phi_{TO,i}} + Q_{\Phi_{TO,e}} \quad [2.11-6]$$

Le seguenti espressioni dei vari componenti della 2.11-1 sono frutto della risoluzione analitica della rete equivalente di Fig. 2.11.1 mediante calcolo del sistema lineare equivalente col metodo della sovrapposizione degli effetti dei diversi generatori.

- Scambio di calore tra ambiente interno e aria esterna dovuto alla sola differenza di temperatura interno-esterno:

$$Q_{\Delta\theta_{i,e}} = \left( \frac{1}{\frac{R_{V,e}R_E}{R_{V,e} + R_E} + \frac{R_{O,I}R_P}{R_{O,I} + R_P}} \right) \Delta\theta_{i,e} \quad [2.11-7]$$

- Flusso di calore entrante nell'ambiente interno e dovuto al solo irraggiamento "trasparente-trasparente":

$$Q_{\Phi_{TT}} = \Phi_{TT} \quad [2.11-8]$$



- Flusso di calore entrante nell'ambiente interno e dovuto al solo irraggiamento "opaco" esterno:

$$Q_{\Phi_o} = \left( \frac{r_{ee} R_{V,e}}{R_{PP} R_E + R_{V,e} (R_E + R_{PP})} \right) \Phi_o \quad [2.11-9]$$

- Flusso di calore entrante nell'ambiente interno e dovuto al solo irraggiamento "trasparente-opaco interno":

$$Q_{\Phi_{TO,i}} = \left( 1 - \frac{R_{O,i} R_P}{(R_{O,i} + R_{PPP})(R_P + R_{PE})} \right) \Phi_{TO,i} \quad [2.11-10]$$

- Flusso di calore entrante nell'ambiente interno e dovuto al solo irraggiamento "trasparente-opaco esterno":

$$Q_{\Phi_{TO,e}} = \left( \frac{R_{V,e} (R_E - r_{ei})}{(R_{PP} + R_{V,e}) \left( R_E + \frac{R_{V,e} R_{PP}}{R_{V,e} + R_{PP}} \right)} \right) \Phi_{TO,e} \quad [2.11-11]$$

dove:

$$R_P = R_{T,i} \parallel R_{V,i} = \frac{R_{T,i} R_{V,i}}{R_{T,i} + R_{V,i}}$$

$$R_{PP} = R_{T,i} \parallel R_{V,i} \parallel R_{O,i} = \frac{1}{\frac{1}{R_{T,i}} + \frac{1}{R_{V,i}} + \frac{1}{R_{O,i}}}$$

$$R_{PE} = R_E \parallel R_{V,e} = \frac{R_E R_{V,e}}{R_E + R_{V,e}}$$

$$R_{PPP} = R_{T,i} \parallel R_{V,i} \parallel R_E \parallel R_{V,e} = R_P \parallel R_{PE} = \frac{1}{\frac{1}{R_{T,i}} + \frac{1}{R_{V,i}} + \frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_{V,e}}}$$

$$R_{V,e} = \frac{3600}{\rho c_p G_{spazio/esterno}} = \text{Resistenza termica per ventilazione tra spazio non climatizzato ed esterno.}$$

$$R_{V,i} = \frac{3600}{\rho c_p G_{interno/spazio}} = \text{Resistenza termica per ventilazione tra spazio non climatizzato ed interno.}$$

Nella suddivisione dei carichi termici si è deciso di considerare carico per trasmissione e ventilazione quello risultante dalla relazione 2.11-7, mentre si considerano tutti gli altri carichi imputabili all'irraggiamento, anche se molti di essi giungono nell'ambiente interno grazie alla trasmissione e ventilazione.

Per quanto riguarda lo scambio per trasmissione e ventilazione [2.11-7], al fine di poterlo inserire nella struttura di calcolo proposta dalla norma, si è proceduto a trasformarlo in fattore di correzione della temperatura esterna.

Per quanto riguarda lo scambio per trasmissione è stato ricavato il fattore  $b_{tr}$  dividendo la quota per trasmissione del coefficiente di scambio termico della 2.11-7, per il coefficiente di scambio termico che si sarebbe verificato senza spazio non climatizzato. La quota per trasmissione della 2.11-7 è stata ricavata moltiplicando tale coefficiente per il rapporto tra la resistenza di ventilazione e la resistenza totale. Infatti le resistenze di ventilazione e di trasmissione interne sono tra loro in parallelo e costituiscono un partitore di flussi.

$$b_{tr} = \frac{H_{T,con\_spazio\_nn\_risc}}{H_{T,senza\_spazio\_nn\_risc}} = \left( \frac{1}{\frac{R_{V,e} R_E}{R_{V,e} + R_E} + \frac{R_{O,I} R_P}{R_{O,I} + R_P}} \right) \frac{R_{V,i}}{R_{V,i} + R_P} \frac{1}{\sum_i A_i U_i} \quad [2.11-12]$$

Per quanto riguarda lo scambio per ventilazione è stato ricavato il fattore  $b_{ve,u}$  dividendo la quota per ventilazione del coefficiente di scambio termico della 2.11-7, per il coefficiente di scambio termico che si sarebbe verificato senza spazio non climatizzato. La quota per ventilazione della 2.11-7 è stata ricavata moltiplicando tale coefficiente per il rapporto tra la resistenza di trasmissione e la resistenza totale. Infatti le resistenze di ventilazione e di trasmissione interne sono tra loro in parallelo e costituiscono un partitore di flussi.

$$b_{ve,u} = \frac{H_{V,con\_spazio\_nn\_risc}}{H_{V,senza\_spazio\_nn\_risc}} = \left( \frac{1}{\frac{R_{V,e} R_E}{R_{V,e} + R_E} + \frac{R_{O,I} R_P}{R_{O,I} + R_P}} \right) \frac{R_P}{R_{V,i} + R_P} \frac{1}{\rho_a c_a q_{ve,u,set1}}$$

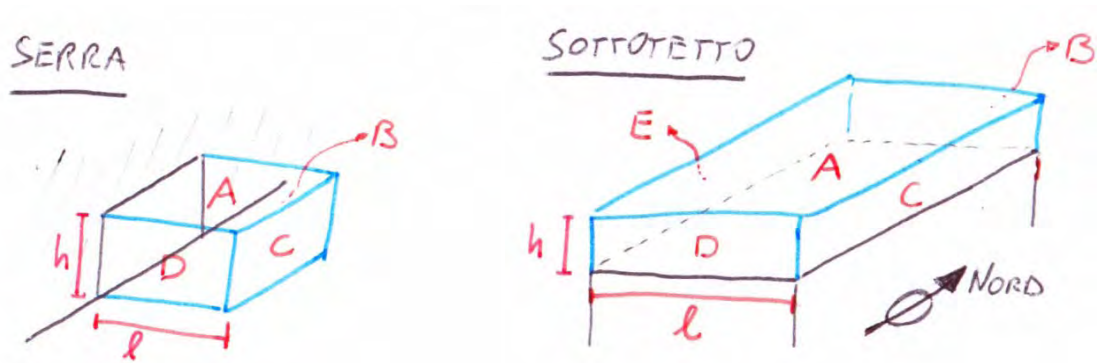
[2.11-13]

Si rimanda quindi ai singoli capitoli su trasmissione, ventilazione e irraggiamento per l'applicazione dei suddetti coefficienti al calcolo degli scambi termici.

### 2.11.2 Limiti del modello ed ipotesi di calcolo

Le assunzioni principali che sottendono al modello di calcolo proposto sono le seguenti:

1. Nella prima versione di Archi-Energy i locali non climatizzati sono strutturati necessariamente con una sola faccia confinante con lo spazio interno climatizzato. Il modello è facilmente estendibile a casi più generali nelle versioni successive del software. L'attuale modello permette quindi di valutare efficacemente le serre addossate ad una parete dell'edificio nonché i sottotetti soprastanti gli spazi climatizzati, secondo il seguente schema di principio:



2. La temperatura dell'aria è considerata sempre uniforme in tutto lo spazio.
3. Il sistema si considera in regime stazionario.
4. Il calcolo del flusso incidente sui vari componenti dell'involucro (relazioni 2.11-7, 2.11-8, 2.11-9, 2.11-10, 2.11-11) è basato su una serie di assunzioni riguardanti l'irraggiamento sulle diverse facce e le caratteristiche di tali facce nonché degli spazi interni. Tali assunzioni possono essere ricavate e comprese direttamente dalle formule di cui sopra. D'altra parte un calcolo esatto necessiterebbe di una simulazione oraria dei parametri fisici, il che esula dalle finalità del presente studio.
5. Nel calcolo effettivo del software tutte le grandezze riguardanti ombreggiamento, superficie opaca/trasparente e ventilazione assumono diversi valori impostabili dall'utente per la stagione estiva e per quella invernale.
6. Il calcolo dei fattori di correzione della temperatura esterna (2.11-12 e 2.11-13) viene effettuato dal software con i set-point<sub>1</sub> (diurni) di climatizzazione e ventilazione. Gli stessi fattori vengono poi utilizzati anche per i periodi in cui sono presenti set-point diversi. Ciò conduce ad errori solo se è molto forte la differenza tra la ventilazione a set-point 1 e quelle a set-point 2 e set-point-freecool. Ciò normalmente non si verifica e in ogni caso comporta errori di tipo conservativo sia d'estate che d'inverno.

## 2.12 Fabbisogno di acqua calda sanitaria

Il fabbisogno di energia legato al consumo di acqua calda sanitaria viene calcolato in modalità del tutto conforme alla norma UNI TS 11300-2 (par. 5.2):

$$Q_{h,w} = \sum_i \rho c V_w (\theta_{er} - \theta_o) G \quad [2.12-1]$$

dove:

$Q_{h,w}$  = Fabbisogno di energia termica per riscaldare il volume d'acqua richiesto alla temperatura di set-point [Wh].

$V_w$  = Volume d'acqua giornaliero richiesto durante il periodo di calcolo [ $m^3/G$ ].

$\rho c$  = Densità volumica dell'acqua per calore specifico = 1162 Wh/ $m^3K$ .

$(\theta_{er} - \theta_o)$  = Differenza tra la temperatura di erogazione e quella di ingresso dell'acqua fredda sanitaria [K]. La norma consiglia di fissare la prima a 40°C e la seconda a 15°C.

$G$  = Numero di giorni del periodo di calcolo.

Per ciò che concerne il calcolo del volume d'acqua richiesto, la norma adotta il seguente calcolo:

$$V_w = a N_u \quad [2.12-1]$$

dove:

$a$  = Fabbisogno giornaliero specifico [l/G].

$N_u$  = Parametro di proporzionalità che dipende dalla destinazione d'uso dell'edificio.

Si riportano di seguito le tabelle per la determinazione dei parametri succitati.

Valori di  $a$  per le abitazioni (l/Gm<sup>2</sup>)

Fabbisogni	Calcolo in base al valore di $S_u$ per unità immobiliare [m <sup>2</sup> ]			Valore medio riferito a $S_u = 80 \text{ m}^2$
	$\leq 50$	51- 200	$>200$	
$a$	1,8	$4,514 \times S_u^{-0,2356}$	1,3	1,6
Fabbisogno equivalente di energia termica utile [Wh/G m <sup>2</sup> ]	52,3	$131,22 \times S_u^{-0,2356}$	37,7	46,7
Fabbisogno equivalente di energia termica utile [kWh/m <sup>2</sup> anno]	19,09	$47,9 \times S_u^{-0,2356}$	13,8	17,05

Valori per destinazioni diverse dalle abitazioni (Fabbisogni mensili in litri a 40 °C con  $\Delta T = 25 \text{ K}$ )

Tipo di attività	$a$	$N_u$
Hotel senza lavanderia 1 stella 2 stelle 3 stelle 4 stelle	40 l/G letto 50 l/G letto 60 l/G letto 70 l/G letto	Numero di letti e numero giorni mese
Hotel con lavanderia 1 stella 2 stelle 3 stelle 4 stelle	50 l/G letto 60 l/G letto 70 l/G letto 80 l/G letto	Numero di letti e numero giorni mese
Altre attività ricettive diverse dalle precedenti	28 l/G letto	Numero di letti e numero giorni mese
Attività ospedaliera day hospital	10 l/G letto	Numero di letti
Attività ospedaliera con pernottamento e lavanderia	90 l/G letto	Numero di letti
Scuole Scuole materne e asili nido	- 15 l/G	Numero di bambini
Attività sportive/palestre	100 l/G	Per doccia installata
Uffici	0,2	l/m <sup>2</sup> G
Negozi	-	
Ristoranti	10 l/G	Numero di ospiti per numero di pasti
Catering e self service	4 l/G	Numero di ospiti per numero di pasti

## **2.13 Modellazione degli impianti**

La modellazione degli impianti è realizzata in gran parte conformemente a quanto specificato nelle norme UNI TS 11300 -2, -3, -4.

Per brevità si è deciso di non riportare trattazione ivi affrontata, ma piuttosto si rimanda alle norme stesse per tutti i riferimenti di calcolo.

## **Capitolo 3**

### **Guida al funzionamento del software**



### **3.1 Presentazione**

Archi-Energy è un programma di modellazione energetica basato sugli algoritmi di calcolo mensile riportati sulla normativa italiana ed europea, in particolare le norme UNI TS 11300-1, -2, -3, -4 e la norma UNI ISO 13790. Esso è quindi in grado di svolgere tutti i calcoli conformemente a tali normative producendo risultati confrontabili e certificabili.

Al tempo stesso si è ritenuto di poter migliorare alcuni aspetti del calcolo normativo e si sono quindi implementati algoritmi alternativi che conducono a risultati differenti. In conclusione il software effettua entrambi i calcoli, sta quindi all'utente scegliere quali dei due risultati prendere in considerazione.

Il risultato normativo è chiaramente da preferire quando si ha necessità di ottenere risultati certificabili e ripetibili. Il secondo è invece generalmente più aderente alla realtà, quindi preferibile quando lo scopo del calcolo è una diagnosi energetica finalizzata ad interventi di riqualificazione.

## 3.2 Obiettivo

Come menzionato sinteticamente nell'introduzione, l'obiettivo è di realizzare una piattaforma di calcolo che sappia rispondere ad una serie di problematiche specifiche nelle quali si imbattono i tecnici che si apprestano a valutare un intervento di riqualificazione energetica a qualsiasi scala.

In particolare, le funzionalità che caratterizzano il software implementato sono le seguenti:

- Analisi energetico/economica del sistema edificio-impianto per tutti gli utilizzi energetici: riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, utenze elettriche, utenze gas.
- Calcolo differenziato che incorpora due differenti algoritmi a seconda delle necessità:
  - quello standard descritto dalle norme UNI TS 11300, al fine di eseguire valutazioni ripetibili in base ai parametri contenuti nella norma ed eseguire la classificazione energetica degli edifici;
  - quello alternativo, costruito in questo lavoro di ricerca, in grado di seguire in modo più accurato gli effettivi utilizzi del sistema edificio-impianto anche in presenza di utilizzi discontinui e soluzioni tecniche particolari.
- Classificazione energetica in base alle normative vigenti.
- Flessibilità e scalabilità del campo di applicazione: appartamenti, edifici, gruppi di edifici o intere città con qualsiasi destinazione d'uso (residenziale e non residenziale) sia di nuova costruzione che già esistenti.
- Riguardo alla valutazione energetica di grandi patrimoni edilizi: integrazione di algoritmi evolutivi in grado di studiare l'andamento globale delle emissioni di CO<sub>2</sub> negli anni in base alle politiche sostegno alla riqualificazione energetica adottate.

Funzionalità utile per pianificare il raggiungimento degli obiettivi di riduzione dei gas serra su scala locale o nazionale. Lo studio sulle città è già stato applicato con successo al caso di Roma con una versione embrionale del software [De Santoli, Mancini, Cecconi 2009-2011] ed è estendibile ad altre città.

- Analisi comparativa semplice ed efficace sulle possibili soluzioni di intervento sull'involucro edilizio e sugli impianti con valutazioni dei costi, dei benefici e dei ritorni economici.
- Inserimento dati rapido e semplice per ridurre i tempi degli screening preliminari.
- Possibilità di valutare soluzioni innovative del sistema architettonico-impiantistico: serre solari, schermi solari complessi, pareti ventilate, ventilazione naturale, cogenerazione, trigenerazione, solar-cooling, fotovoltaico, solare termico, eolico, biomasse, biogas, idrogeno, illuminazione ad alta efficienza, ecc.
- Filosofia *open-source* degli algoritmi di calcolo (su piattaforma Excel - VisualBasic) e possibilità di personalizzazione delle funzionalità. Software completamente trasparente in cui ogni operazione viene spiegata e commentata in modo da rappresentare anche uno strumento didattico al servizio degli studenti.

### 3.3 Struttura del software

In questo paragrafo si intende analizzare dettagliatamente il sistema di calcolo, al fine di spiegare, punto per punto, sia l'interfaccia utente, sia, più in profondità, gli algoritmi di calcolo che si nascondono al di sotto di essa.

#### 3.3.1 Genesi del progetto

Il primo antenato di Archi-Energy è un sistema di calcolo su piattaforma *Excel* realizzato dal Prof. Livio De Santoli e dal Prof. Francesco Mancini, in grado di calcolare molto rapidamente il fabbisogno invernale ed estivo di un edificio [De Santoli, Mancini, 2002]. La modellazione dell'involucro e degli impianti era estremamente semplificata, ma la forza di questo modello risiedeva proprio nella semplicità. L'accuratezza è sicuramente un pregio in senso assoluto, ma può rivelarsi controproducente, o semplicemente inutile, nei casi in cui occorre focalizzare l'attenzione su pochi parametri fondamentali, tralasciando quelli di importanza secondaria. D'altro canto l'analisi energetica è di per sé già affetta da incertezze notevoli dovute, se non altro, all'aleatorietà dei fenomeni atmosferici e dell'utilizzo umano dei locali. Su grandi estensioni edilizie tale aleatorietà si moltiplica sensibilmente a causa di una sempre minore conoscenza delle esatte caratteristiche di ogni singolo stabile. E' dunque inutile che l'accuratezza del software sia superiore a quella dei dati in ingresso. Per questi motivi il modello semplificato è stato di grande utilità in molti casi.

Durante il primo anno di dottorato, in corrispondenza del sempre crescente impegno del team di ricerca sul problema energetico della città di Roma, è nata la necessità di implementare nuove funzionalità nel sistema di calcolo. In particolare l'applicazione all'intera città ha necessitato di prevedere algoritmi di input più complessi finalizzati a determinare le grandezze dimensionali degli edifici nonché le caratteristiche prestazionali del sistema involucro/impianto a partire dai dati aggregati disponibili. Inoltre ha necessitato un'elaborazione aggiuntiva per tenere in considerazione l'evoluzione nel tempo dei fabbisogni energetici in relazione allo sviluppo della città ed

agli interventi di riqualificazione effettuati. Tali elaborazioni hanno permesso di ottenere i risultati pubblicati all'interno del *Sustainable Energy Action Plan* della città di Roma.

I risultati positivi hanno indotto il team di ricerca a sviluppare ulteriormente il modello con funzionalità più avanzate legate all'introduzione di soluzioni architettoniche e impiantistiche più complesse e articolate. A quel punto è apparsa chiara la limitatezza del software di base che non aveva fondamenta così solide per poter sostenere una struttura ancora più complessa, sia dal punto di vista computazione che da quello dell'interfaccia grafica. Si è così deciso di riprogettare integralmente il software, a cui si è dato il nome Archi-Energy.

### 3.3.2 Struttura generale del sistema di calcolo

Archi-Energy, come i suoi predecessori, si basa su piattaforma Excel. La sua architettura è fortemente scalabile per potersi adattare facilmente alla simulazione energetica di un singolo edificio, di gruppi di edifici o di intere città.



Fig. 3.3.1. Diagramma logico della struttura generale del sistema di calcolo. Ogni riquadro è un file. I riquadri in basso rappresentano i file di calcolo che sono tutti uguali a meno dei dati inseriti. Il riquadro in alto rappresenta il file di raggruppamento e confronto, unico per ogni progetto.

Come si può vedere in Fig.3.3.1, la struttura logica del programma è costituita da una o più unità di calcolo, ciascuna corrispondente ad un file. Ogni unità è indipendente dall'altra ed in grado di effettuare una valutazione energetica completa della struttura che viene descritta al suo interno. Un file rappresenta quindi la più piccola entità schematizzabile e può rappresentare, a seconda della scelta dell'utente, una singola zona termica, un appartamento, un edificio o un gruppo di edifici. Tale scelta deve essere effettuata considerando le finalità del calcolo, l'accuratezza richiesta ed i dati a disposizione.

Se non è necessaria un'elaborazione congiunta tra diverse entità, allora è sufficiente utilizzare un singolo file, altrimenti occorre compilare un file per ogni entità che debba essere trattata separatamente. In questo caso i risultati finali vengono riportati in un file finale di ricapitolazione generale che attinge dati da tutte le entità presenti nei singoli file e permette una presentazione e/o elaborazione finale congiunta.

Tale struttura permette quindi una differente complessità di utilizzo a seconda delle finalità del caso specifico.

### 3.3.3 Struttura del singolo file

Ogni singolo file permette di modellare il sistema edificio/impianto di una singola entità in una serie di configurazioni liberamente modificabili dall'utente.

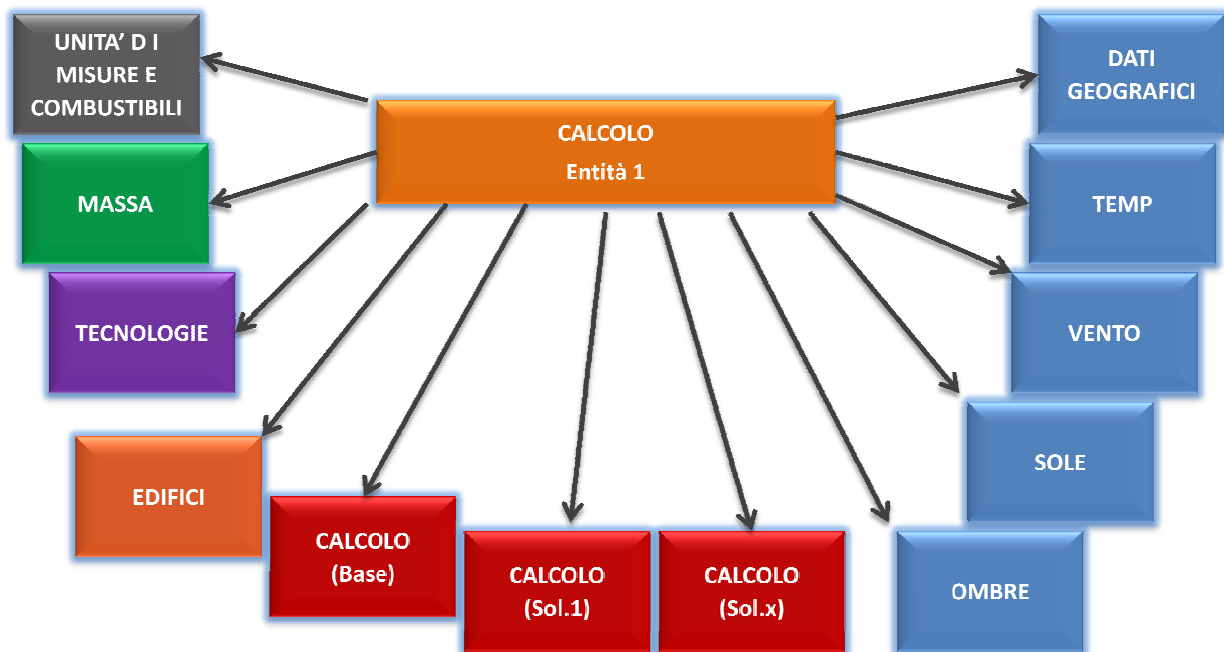


Fig. 3.3.2. Diagramma logico della struttura interna di ogni singolo file.

Ogni file contiene quindi al suo interno una serie di fogli di calcolo con i dati comuni di tutte le configurazioni (per es. dati climatici, tecnologie disponibili, costanti fisiche, ecc) ed uno o più fogli che descrivono la configurazione di calcolo specifica.

I fogli comuni sono i seguenti:

- UNITA' DI MISURA E COMBUSTIBILI

Contiene una serie di grandezze fisiche valide per tutti i calcoli. Si tratta di costanti fisiche, fattori di conversione tra unità di misura e dati invariabili. Esso contiene inoltre i dati relativi ai combustibili e vettori energetici utilizzabili nel calcolo. Sono stati presi in considerazione i seguenti: Petrolio greggio (riferimento), Olio combustibile BTZ, Gasolio da riscaldamento, Benzina, Carbone di legna, Legname, Pellet, Rifiuti solidi urbani, Gas di petrolio liquefatti (GPL), Propano, Butano, Gas naturale, Energia elettrica. Di ognuno di essi è presente

una scheda che ne definisce le caratteristiche energetiche per unità di massa o di volume (potere calorifico inferiore, potere calorifico superiore, conversione in energia primaria), le caratteristiche ambientali (emissioni di CO<sub>2</sub>), ed i prezzi medi di mercato. Tutti i dati sono modificabili liberamente ed adattabili alla situazione specifica. Le fonti dei dati sono varie e comprendono: norma UNI TS 11300-2 B.23, inventario nazione UNFCCC, DM 115 del 30/5/2008, Delibera AEEG EEN 3/08, pubblicazioni scientifiche.

- DATI GEOGRAFICI

Contiene l'altitudine e le coordinate geografiche di tutti i capoluoghi di provincia italiani, tratte dal prospetto VII della norma UNI 10349.

- TEMP

Contiene i valori giornalieri medi mensili della temperatura dell'aria esterna e della pressione parziale di vapore ed i valori delle temperature ed escursioni massime estive, tratte dai prospetti V, VI, XV, XVI della norma UNI 10349, oltre che le temperature orarie annuali tratte da elaborazione sui dati geografici orari.

- VENTO

Contiene i valori giornalieri medi mensili della velocità del vento tratte dal prospetto XIV della norma UNI 10349.

- SOLE

Contiene i valori giornalieri medi mensili della radiazione solare diffusa e diretta sul piano orizzontale, della radiazione incidente sulle superfici alle varie esposizioni (Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ovest, Ovest), dell'irradianza massima estiva su superfici verticali, dell'irradianza trasmessa attraverso un vetro semplice disposto verticalmente, dell'angolo di incidenza dell'irradianza solare massima estiva, dell'angolo di altezza solare e azimutale massimo estivo, tratte dai prospetti VIII, IX, X, XI, XII, XIII, XVII, XVIII, XIX, XX della norma UNI 10349.



- OMBRE

Contiene i valori medi mensili dei fattori di ombreggiatura dovute a ostruzioni orizzontali, aggetti orizzontali e aggetti verticali, per le diverse esposizioni (Nord, Est, Sud, Ovest), per le diverse latitudini (36°, 38°, 40°, 42°, 44°, 46°N) e per i diversi angoli di ostruzione (a passi di 10°), tratte dagli allegati D.1, D.2 e D.3 della norma UNI-TS 11300-1. Questi dati sono stati elaborati mediante interpolazione lineare per ottenere valori con un passo più ridotto sia dell'angolo di ostruzione (5° anziché 10°) che di quello azimutale (45° anziché 90°), a favore dell'accuratezza del calcolo.

- MASSA

Contiene i valori della capacità termica superficiale dell'involucro in funzione delle caratteristiche dei componenti edilizi e del numero di piani, tratte dal prospetto 16 della norma UNI-TS 11300-1.

- EDIFICI

Contiene i dati comuni per tutte le diverse configurazioni dell'entità descritta dal file. In esso viene richiesta la denominazione di tale entità, la sua descrizione e la localizzazione geografica. In base a questi dati vengono riportati, nella parte nascosta del foglio, i dati climatici specifici della zona. La località è di fatto l'unico parametro comune per tutte le configurazioni, ogni altro dato può essere variato.

- TECNOLOGIE

Contiene i dati comuni per tutte le diverse tecnologie utilizzabili nel calcolo. Esse comprendono le tecnologie legate all'involucro (tipologia e prestazioni delle pareti opache, delle vetrate e dei solai), quelle legate a spazi speciali (locali non riscaldati, serre e sottotetti) e quelle legate alle configurazioni impiantistiche (generatori di calore ed energia frigorifera, generatori elettrici, energie rinnovabili, tipologie d'impianto, tipologia di regolazione, ecc). Di ognuna l'utente può definirne ogni caratteristica tecnica peculiare, compreso il prezzo di realizzazione. Per una descrizione più accurata consultare i paragrafi 3.5 e 3.6.

I fogli specifici sono i seguenti:

- CALCOLO (Baseline):

Contiene l'interfaccia utente per l'inserimento di tutti i dati specifici del singolo calcolo, comprendenti la definizione dimensionale e prestazionale dell'involucro edilizio, l'impostazione dei parametri gestionali riguardanti l'utilizzo effettivo della struttura, il valore dei set-point di climatizzazione e ventilazione, l'inserimento dei carichi interni, la definizione dei parametri dinamici della struttura, l'inserimento ed il bilanciamento delle configurazioni impiantistiche. Nel medesimo foglio vengono mostrati, spiegati e svolti tutti i calcoli. Infine vengono infine presentati i risultati in termini di energia, di impatto ambientale e di impegno economico. Il foglio "CALCOLO (Baseline)" costituisce la configurazione di partenza che serve come riferimento per tutte le altre configurazioni alternative. Nel caso di ristrutturazioni esso rappresenta lo stato iniziale dell'immobile. Nel caso di nuove edificazione, esso può rappresentare lo standard di riferimento consistente, per esempio, nel mero rispetto della normativa vigente. Una spiegazione più accurata del foglio "CALCOLO (Baseline)" sarà realizzata nel paragrafo 3.7.

- CALCOLO (Sol.1):

Si tratta di una copia quasi esatta del foglio "Calcolo (Baseline)". L'unica differenza consiste nel fatto che esso descrive una soluzione tecnica alternativa a quella *baseline*. Infatti nella presentazione dei risultati sono riportati degli indici di confronto con la soluzione di base. L'utente è libero di duplicare all'infinito il foglio "Calcolo (Sol.1)" per creare una serie di soluzioni alternative da confrontare a quella di base e valutare quale tra esse sia la più conveniente. Una spiegazione più accurata del foglio "CALCOLO (Sol.1)" sarà realizzata nel paragrafo 3.8.

### 3.4 Impostazione del lavoro

Il primo passo per l'utilizzo di Archi-Energy è individuare l'oggetto e l'obiettivo del calcolo. In questa prima versione, il software permette il calcolo per una sola zona termica per ogni file, quindi occorre valutare cosa si intenda modellare.

Applicazioni tipiche possono essere le seguenti:

1. Studio un appartamento singolo

E' sufficiente un solo file dove modellare l'appartamento con tutte le relative caratteristiche del sistema involucro/impianto nonché tutte le possibili migliorie ad esso applicabili.

2. Studio di più appartamenti o di un edificio

Se non è necessario il dettaglio di ogni singolo appartamento è possibile utilizzare un solo file, come al punto 1, modellando in esso l'intero edificio anziché l'appartamento. In caso contrario occorre modellare in ogni file i singoli appartamenti e poi unificarli mediante il file di ricapitolazione.

3. Studio di più edifici o di un'intera città

Si può procedere come al punto 2, modellando il gruppo di edifici come un'unica entità che racchiude al suo interno le caratteristiche medie dei singoli edifici. Altrimenti è possibile modellare i singoli edifici (o gruppi di edifici tra loro omogenei) e poi unificarli mediante il file di ricapitolazione.

E' evidente che l'accuratezza del calcolo diminuisce al crescere dell'estensione del parco edilizio analizzato. Sta all'utente scegliere adeguatamente la tipologia di simulazione in base alle necessità di accuratezza nonché alla qualità dei dati in possesso.

### 3.5 Definizione delle tecnologie dell'involucro

Una volta definita l'impostazione di base è possibile iniziare la costruzione del modello. Il primo passo è quello di definire le tecnologie che si prevede di utilizzare nel calcolo. Il foglio TECNOLOGIE racchiude tutte le soluzioni tecniche riguardanti il sistema involucro/impianto. Si deve quindi procedere a compilarlo correttamente. La prima parte del foglio TECNOLOGIE riguarda l'involucro e comprende gli elementi descritti in seguito.

#### 3.5.1 Superfici disperdenti, componenti opachi

In questa tabella si inseriscono, una per colonna, le tipologie di parete opaca che si intende utilizzare nel calcolo. Per definirle è necessario per prima cosa scegliere un "nome tipologia" che deve essere breve e significativo poiché in base a quello verranno scelte le diverse tecnologie. Nella riga successiva è possibile inserire una descrizione più lunga, in modo da spiegare meglio la parete descritta.

I dati tecnici riguardano il valore di trasmittanza termica (da calcolare esternamente mediante altro software), conduttanze superficiali, assorbività media della superficie esterna nonché costi di costruzione.

Riguardo a questi ultimi essi si differenziano per i due possibili casi di nuova costruzione oppure di riqualificazione. Il primo si riferisce al costo della parete se costruita durante l'edificazione del fabbricato, il secondo al costo per un intervento di riqualificazione (esempio: coibentazione di una parete esistente). I costi sono espressi mediante tre componenti: costo fisso, costo variabile 1 (al di sotto di una soglia di metri quadri personalizzabile) e costo variabile 2 (al di sopra della soglia).

## 1. INVOLUCRO

## 1.1 Superfici disperdenti

## 1.1.1 Componenti opachi (pareti, solai, coperture, ecc)

Nome tipologia	TIPOLOGIA					
	1E-ParEst	1E-ParTerra	1E-SolSottot	1E-SolCoper	1E-SolTerra	1E-Portone
Descrizione tipologia	Blocchi laterizio alleggerito no	Blocchi laterizio alleggerito no	Separaz. tra ambienti e sottotetto	Copertura latero-cemento isolata	Solaio contro terra non isolato	Portoncino blindato isolato
Trasmittanza (U) [W/m <sup>2</sup> K]	0.75	1.63	0.40	0.54	1.63	1.07
Cond. Superf. Interna (hi) [W/m <sup>2</sup> K]	7.7	7.7	10.00	10.00	5.88	7.70
Cond. Superf. Esterna (he) [W/m <sup>2</sup> K]	25.0	5.0	10.00	25.00	5.00	25.00
Assorbività (a) [adim]	0.60	0.60	0.60	0.60		0.60
Costo nuova costruzione:						
Fisso [€]	0	0	0	0	0	1'600
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]	20	80	80	200	250	170
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]		50	50	150	180	120
Costo riqualificazione:						
Fisso [€]						
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]	20			40	40	
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]				30	30	

Fig. 3.5.1. Screen-shot della sezione del foglio TECNOLOGIE riguardante i componenti opachi.

3.5.2 **Superfici disperdenti, componenti vetrati**

L'impostazione è simile a quella dei componenti opachi, con la differenza che non viene richiesta l'assorbività ma la trasmittanza solare e il fattore di telaio della finestratura, calcolato come la superficie di telaio rispetto alla superficie totale del serramento.

## 1.1.2 Componenti vetrati (finestre, vetrate, ecc)

Nome tipologia	TIPOLOGIA					
	1E-Serram					
Descrizione tipologia	Finestra 4-9-4 telaio in legno					
Trasmittanza termica (U) [W/m <sup>2</sup> K]	3.03					
Cond. Superf. Interna (hi) [W/m <sup>2</sup> K]	7.7					
Cond. Superf. Esterna (he) [W/m <sup>2</sup> K]	25.0					
Trasmittanza solare (g) [adim]	0.77					
Fattore di telaio (Ft) [adim]	0.16					
Costo nuova costruzione:						
Fisso [€]	0					
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]	2	400				
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]		350				
Costo riqualificazione:						
Fisso [€]	0					
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]	2	400				
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]		350				

Fig. 3.5.2. Screen-shot della sezione del foglio TECNOLOGIE riguardante i componenti vetrati .

### 3.5.3 Spazi non climatizzati

Gli spazi non climatizzati sono considerati come delle tecnologie, ossia degli elementi con caratteristiche proprie che si vanno ad aggiungere all'ambiente climatizzato. Tali spazi possono essere modellati secondo quattro tipologie a differente complessità, selezionabili mediante il menu a tendina "Categoria".

#### 1.1.5 Spazi non climatizzati

Nome tipologia	TIPOLOGIA						
	Garage	Scale	Serra1	VanoScale	Sott.Isolato	1E-SottComp	1E-SottSempl
Descrizione tipologia	Garage sotto abitazione	Vano scale	Serra addossata	Vano scae condominiale	Sottotetto isolato	Sottotetto modello completo	Sottotetto modello semplice
Categoria	Temp. fissa	No irragg. - T	Serra	No irragg. - T	Sottotetto	Sottotetto	No irragg. - Tabelle UNI
Dimensione 'h' (ved. disegno)			3.0		1.5	1.3	
Dimensione 'l' (ved. disegno)			4.0		10.0	18.0	
Trasmitt. term. media invernale (Uue) [W/m <sup>2</sup> K]			1.00		0.75	0.35	
Trasmitt. term. media estiva (Uue) [W/m <sup>2</sup> K]			2.00		0.75	0.35	
Cond. Superf. Spazio non clima (hu) [W/m <sup>2</sup> K]			7.70		7.70	10.00	
Cond. Superf. Esterna (he) [W/m <sup>2</sup> K]			25.00		25.00	25.00	
Resistenza term. invernale (Rue) [W/m <sup>2</sup> K]			0.83		1.17	2.72	
Resistenza term. estiva (Rue) [W/m <sup>2</sup> K]			0.33		1.17	2.72	
Trasparenza invernale Sup. 'A'			80%		0%	0%	
Trasparenza invernale Sup. 'B'			60%		0%	0%	
Trasparenza invernale Sup. 'C'			80%		0%	0%	
Trasparenza invernale Sup. 'D'			60%		0%	0%	
Trasparenza invernale Sup. 'E'					0%	0%	
Trasparenza estiva Sup. 'A'			40%		0%	0%	
Trasparenza estiva Sup. 'B'			60%		0%	0%	
Trasparenza estiva Sup. 'C'			60%		0%	0%	
Trasparenza estiva Sup. 'D'			60%		0%	0%	
Trasparenza estiva Sup. 'E'					0%	0%	
Trasmitt. sol. elem. trasp. (ge)			85%		0%	0	
Coeff. medio assorbimento (α)			40%		50%	60	
Tasso di ventil. esterno invernale [Vol/h]			0.5		0.3	0.3	
Tasso di ventil. esterno estivo [Vol/h]			2.0		0.3	0.3	
Fattore di corr. temp (btr_medio)		0.50		0.60		0.70	0.70
Temperatura interna [°C]	18.0°						
Costo nuova costruzione:							
Fisso [€]			5'000				
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]							
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]							
Costo riqualificazione:							
Fisso [€]			5'000				
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]							
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]							

Fig. 3.5.3. Screen-shot della parte del foglio TECNOLOGIE riguardante gli spazi non climatizzati.

Le categorie selezionabili sono:

- **Temp. fissa**

Si tratta di locali che vengono mantenuti costantemente ad una data temperatura sia d'estate che d'inverno (per es. locali piscina, sauna, celle frigorifere, ecc). Quindi, in realtà, non si tratta di locali non climatizzati ma di locali climatizzati in modo speciale. Di questi locali occorre fornire solo tale temperatura e l'eventuale costo di realizzazione (può essere anche nullo se si tratta di locali esistenti).

- **No irragg. - Tabelle UNI**

Si tratta dei locali non climatizzati presi in considerazione della norma UNI TS 11300 -1. Di essi basta inserire il valore di  $b_{tr,x}$  che viene riportato nel prospetto xxx della norma (riportato anche affianco al calcolo). In caso di locali fortemente irraggiati dal sole tale modello commette errori piuttosto evidenti, quindi se ne sconsiglia l'utilizzo. Anche in questo caso è possibile inserire eventualmente un valore di costo.

- **Serra**

Categoria che permette di modellare locali esterni che si addossano all'edificio su una sola parete e risultano esposti alla radiazione solare. Delle serre occorre dare una precisa descrizione tecnologica. La dimensione della serra è calcolata sulla base dei valori 'h' (altezza) e 'l' (profondità) così come spiegati graficamente in fig. 3.5.4.

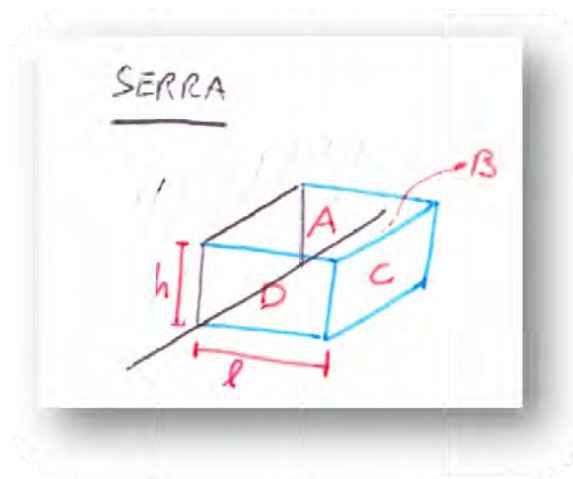


Fig. 3.5.4. Schema di modellazione delle serre in Archi-Energy.

Della serra occorre poi indicare la trasmittanza termica media invernale ed estiva, le conduttanze superficiali, nonché la percentuale di trasparenza invernale ed estiva di tutte le pareti, così come denominate nella figura sopra. Ciò permette di modellare eventuali coperture opache o sistemi schermanti presenti in modo differente nel periodo invernale ed estivo. Occorre inoltre inserire il coefficiente di assorbimento medio della superficie esterna opaca, il tasso di ricambio dell'aria invernale ed estivo tra la serra e l'esterno ed i costi.

Con l'attuale metodo di calcolo non è possibile modellare serre che siano addossate a due o più pareti dell'edificio.

- **Sottotetto**

Categoria che permette di modellare locali esterni che si trovano sovrapposti (in tutto o in parte) alla zona di calcolo. I dati richiesti per i sottotetti sono molto simili a quelli delle serre, infatti il sottotetto viene considerato come una serra sovrapposta all'edificio. Sta all'utente regolare la trasparenza dell'involucro a seconda delle reali condizioni. La principale differenza sta nella definizione geometrica che viene realizzata secondo lo schema di fig. 3.5.5. Questa volta 'h' rappresenta l'altezza del sottotetto e 'l' la larghezza sull'asse EST-OVEST. Sono definite di conseguenza le esposizioni delle diverse facce.



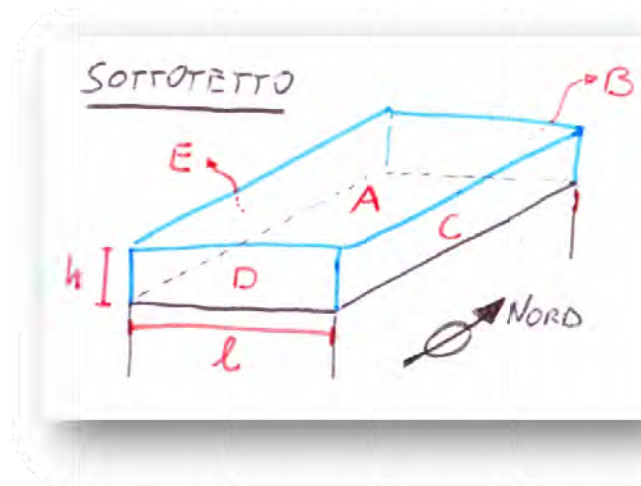


Fig. 3.5.5. Schema di modellazione dei sottotetti in Archi-Energy.

#### 3.5.4 **Ombreggiamenti esterni**

In questa categoria vengono descritte le possibili fonti di ombreggiamento che possono limitare l'apporto solare. Sono possibili quattro tipologie di ombreggiamenti: ostruzioni orizzontali, aggetti orizzontali, aggetti verticali, ombreggiamenti sul piano orizzontale e/o altri schermi.

- **Ostruzioni orizzontali**

Categoria che permette di modellare gli oggetti che si trovano sulla linea dell'orizzonte e limitano quindi la visibilità della parte bassa della volta celeste. Si tratta per esempio di montagne, strutture adiacenti, alberi, siepi e quant'altro. Di essi si può inserire l'altezza e la distanza dalla zona di calcolo. Su questi dati il software calcola l'angolo di ombreggiamento e determina il fattore di *shading* in base alle tabelle fornite dalla norma UNI 10349. Per un'ulteriore finezza nella modellazione l'utente può inserire le percentuali di trasparenza invernale ed estiva, al fine di descrivere in modo ottimale la presenza di vegetazione cedua o ombreggiamenti rimovibili.

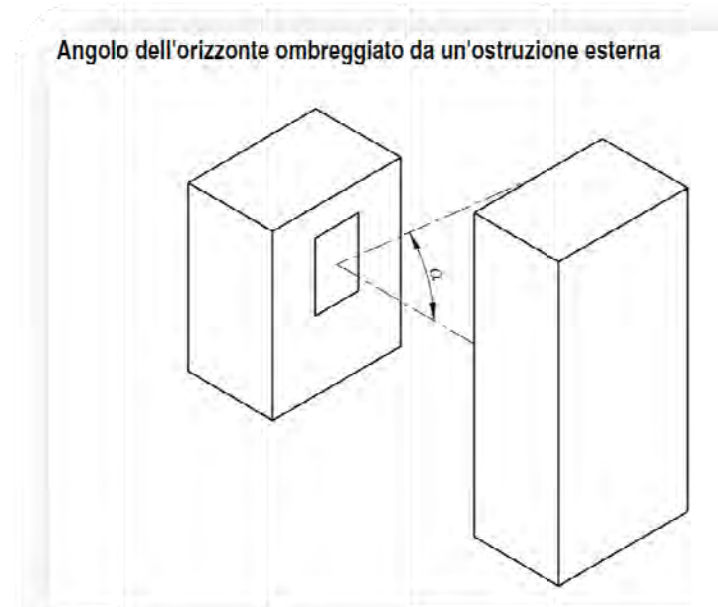


Fig. 3.5.6. Schema di modellazione delle ostruzioni orizzontali secondo la norma UNI TS 11300.

## 1.2 Ombreggiamenti esterni

### 1.2.1 Ostruzioni orizzontali

Nome tipologia	TIPOLOGIA				
	Albero	Ed.Front			
Descrizione tipologia	Albero caduco	Edificio antistante			
Altezza ostruzione [m]	10	15			
Distanza ostruzione [m]	5	10			
Trasparenza invernale [%]	70%	0%			
Trasparenza estiva [%]	10%	0%			
Costo nuova costruzione:					
Fisso [€]					
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]					
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]					
Costo riqualificazione:					
Fisso [€]					
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]					
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]					

Fig. 3.5.7. Screen-shot della sezione del foglio TECNOLOGIE riguardante gli ombreggiamenti per ostruzioni orizzontali.

- **Aggetti orizzontali**

Categoria che permette di modellare gli aggetti (sporgenze dell'edificio) paralleli al terreno. Si tratta per esempio dei balconi del piano superiore, oppure di brise-soleil collocati sopra le vetrate per ridurre l'apporto solare estivo.

Essi vengono definiti mediante il valore di sporgenza dalla parete nonché dell'interdistanza verticale tra due file di aggetti. Quest'ultimo parametro serve per determinare l'angolo esatto di schermatura dell'aggetto, che viene considerato in riferimento al punto centrale tra due file di aggetti. Nel caso in cui sia presente una sola fila inserire il doppio dell'altezza tra il centro della vetrata e la posizione dell'aggetto.

Anche per gli aggetti orizzontali è possibile impostare i valori di trasparenza estiva ed invernale.

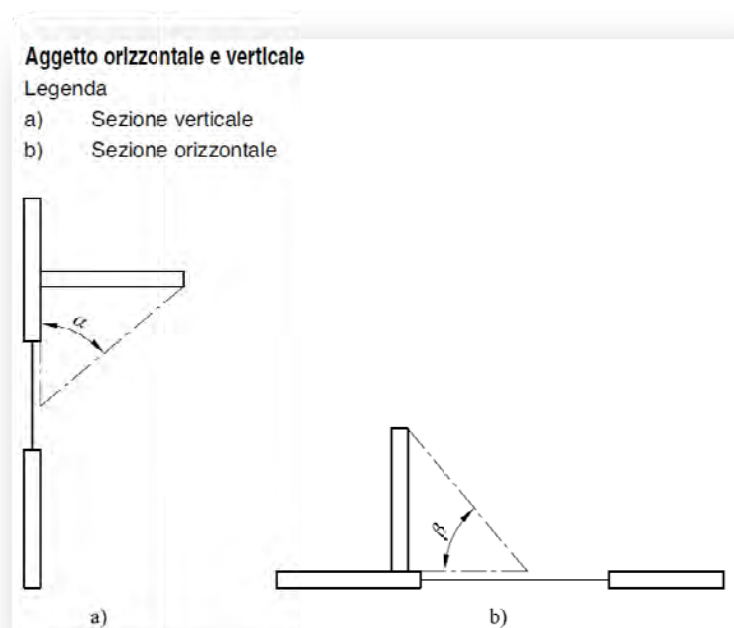


Fig. 3.5.8. Schema di modellazione degli aggetti orizzontali e verticali secondo la norma UNI TS 11300.

<b>1.2.2 Aggetti orizzontali</b>		<b>TIPOLOGIA</b>				
Nome tipologia	Balcone					
Descrizione tipologia	Balconata superiore					
Sporgenza dalla parete [m]	1.50					
Interdistanza verticale aggetti [m]	3.50					
Angolo di schermatura medio ( $\alpha$ ) [°]	49°					
Trasparenza invernale [%]	0%					
Trasparenza estiva [%]	0%					
Costo nuova costruzione:						
Fisso [€]						
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]						
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]						
Costo riqualificazione:						
Fisso [€]						
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]						
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]						

Fig. 3.5.9. Screen-shot della sezione del foglio TECNOLOGIE riguardante gli ombreggiamenti per aggetti orizzontali.

- **Aggetti verticali**

Categoria che permette di modellare gli aggetti (sporgenze dell'edificio) perpendicolari al terreno. Si tratta per esempio di corpi scala esterni, oppure di sporgenze costruite sulla facciate (di solito EST o OVEST) con lo scopo di ridurre l'apporto solare.

Essi vengono definiti mediante il valore di sporgenza dalla parete nonché dell'interdistanza orizzontale tra due file di aggetti. Quest'ultimo parametro serve per determinare l'angolo esatto di schermatura dell'aggetto, che viene considerato in riferimento al punto centrale tra due file di aggetti. Nel caso in cui sia presente una sola fila inserire il doppio della distanza tra il centro della vetrata e la posizione dell'aggetto.

Anche per gli aggetti verticali è possibile impostare i valori di trasparenza estiva ed invernale.

**1.2.3 Aggetti verticali**

	TIPOLOGIA							
Nome tipologia	Agg.Vert							
Descrizione tipologia	Aggetto verticale sulla parete							
Sporgenza dalla parete [m]	1							
Interdistanza orizzontale aggetti [m]	4							
Angolo di schermatura medio ( $\beta$ ) [°]	63°							
Trasparenza invernale [%]	0%							
Trasparenza estiva [%]	0%							
Costo nuova costruzione:								
Fisso [€]								
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]								
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]								
Costo riqualificazione:								
Fisso [€]								
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]								
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]								

Fig. 3.5.10. Screen-shot della sezione del foglio TECNOLOGIE riguardante gli ombreggiamenti per aggetti verticali.

- **Ombreggiamenti sul piano orizzontale (copertura) e/o altri schermi**

Quest'ultima categoria modella tutte le altre categorie di ombreggiamenti che non sono considerati dalla norma UNI 10349. Di essi occorre inserire direttamente il fattore di *shading* invernale ed estivo che può essere quindi calcolato mediante appositi software di simulazione solare.

<b>1.2.4 Ombreggiamenti sul piano orizzontale (copertura) e/o altri schermi</b>		<b>TIPOLOGIA</b>						
Nome tipologia		BriseSoleil	Gazebo					
Descrizione tipologia		Brise soleil sospesi su copertura	Gazebo in copertura					
Fattore di shading invernale [adim]		30%	50%					
Fattore di shading estivo [adim]		60%	50%					
Costo nuova costruzione:								
Fisso [€]								
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]								
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]								
Costo riqualificazione:								
Fisso [€]								
Fino a m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]								
Oltre [€/m <sup>2</sup> ]								

Fig. 3.5.11. Screen-shot della sezione del foglio TECNOLOGIE riguardante gli ombreggiamenti su piano orizzontale e gli altri possibili ombreggiamenti.

## 3.6 Definizione delle tecnologie impiantistiche

Analogamente a quanto descritto nel paragrafo 3.5, occorre definire le tecnologie impiantistiche che si prevede di utilizzare nel calcolo.

### 3.6.1 Generazione solo termica

La prima parte delle tecnologie impiantistiche riguarda gli impianti di generazione del calore. La descrizione di ciascuna tecnologia non si limita alla descrizione del semplice generatore di calore ma definisce le caratteristiche dell'intero impianto, comprensivo quindi dei sistemi di distribuzione, accumulo, emissione e regolazione.

- **Caldaie**

Fanno parte di questa famiglia gli impianti la cui generazione di calore è realizzata mediante combustione diretta di sostanze infiammabili di qualsiasi origine (anche rinnovabile). Il modello che descrive il funzionamento di tali sistemi è del tutto conforme a quanto riportato nella norma UNI TS 11300 -2.

Anche in questo caso per ogni colonna è possibile descrivere una tecnologia definendone un nome caratteristico, una descrizione ed una serie di dati tecnici. In particolare, per quanto riguarda il sottosistema di generazione, è necessario definire il tipo di combustibile utilizzato tra quelli disponibili (gas naturale, GPL, gasolio da riscaldamento, olio combustibile BTZ, legna, pellet, rifiuti solidi urbani). Poi si definisce la tipologia di generatore tra quelle suggerite dalla norma, nonché una serie di dati tecnici sulle temperature e le condizioni di utilizzo del generatore<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Per maggiori informazioni consultare la norma UNI TS 11300 -2

Per quanto riguarda il sottosistema di emissione è possibile selezionare la tipologia ed il salto termico esistente sui terminali.

Sui sistemi di regolazione e distribuzione è possibile impostare la tipologia presente.

Riguardo ai costi anche in questo caso è possibile la differenziazione tra costo “nuovo” e costo “riqualificato” per diverse taglie di impianto. E’ inoltre possibile impostare un costo di manutenzione definito come percentuale sul costo di investimento iniziale.

Riguardo ai sistemi di incentivazione da Titoli di Efficienza Energetica (certificati bianchi) è possibile inserire il coefficiente di durabilità e la vita utile così come definiti dall’Autorità per l’Energia Elettrica ed il Gas in base alla tipologia di impianto realizzato.

E’ possibile anche inserire il valore di una eventuale detrazione fiscale sul costo di acquisto dell’impianto.



## 2. IMPIANTI

## 2.1 Generazione termica

## 2.1.1 Caldaie

		TIPOLOGIA			
Nome tipologia		GasTradCentralizz	GasCondCentralizz	BiomCentralizz	
Descrizione tipologia		Caldaia tradizionale a gas condominio	Caldaia a condensazione a gas condominio	Caldaia a biomassa per condominio	
Sottosistema di generazione:		Ved. UNITS 11300-2 6.6.5)			
Combustibile		Gas naturale	Gas naturale	Pellet	
Tipo di generatore		Camera stagna tipo C per	A gas a condensazione (4	Atmosferico tipo B (2 ste	
$\Delta\theta$ fumi-acqua ritorno [°C]			10°		
Temperatura di mandata ( $\theta_m$ ) [°C]		65°	60°	80°	
Valore di base del rendimento ( $\eta_{gn,ba}$ )		93.0%	104.0%	90.0%	
Installazione esterna (F2.1)		SI -4.0%	NO	SI -9.0%	
Accum. esterno (solo condens.) (F2.2)			NO		
Altezza camino > 10m (F3)		SI	NO	SI -2.0%	
Temperatura mandata > 65° (F4)		NO	NO	SI -2.0%	
Generatore monostadio (F5)		SI	NO	SI	
Camino >10m senza chius. aria all'arr		SI	SI	SI	
Temp. di rit. mese più freddo (F7)		40°	50° -4.0%	55°	
Sottosistema di emissione:		Ved. UNITS 11300-2 6.6.1)			
Tipo di emissione		*Radiatori su par. est. no	Pannelli a pavimento no	*Radiatori su par. est. no	
$\Delta\theta$ sist. emissione [°C]		25°	10°	25°	
Sottosistema di regolazione:		Ved. UNITS 11300-2 6.6.2)			
Tipo di regolazione		Climatica con sonda este	Clima+Zona, P banda 1°	Climatica con sonda este	
Sottosistema di distribuzione:		Ved. UNITS 11300-2 6.6.3)			
Tipo di distribuzione		Imp. centr. con montanti	Imp. centralizz. distrib. o	Imp. centr. con montanti	
Isolam. distribuzione nel cantinato		Prima del 1961	L.10/91 (dopo 1993)	L.373/76 (dopo 1976)	
<b>Costi</b>					
Costo nuova costruz. [€/kW]:					
Fino a kW		35	250	350	320
			200	300	270
Costo riqualificazione [€/kW]:					
Fino a kW					
Costo manutenzione [%invest./anno]			2%	2%	2%
<b>Certificati bianchi</b>					
Coefficiente di durabilità (tau)					
Vita utile (U)					
<b>Detrazione fiscale</b>					
Aliquota		0%	50%	50%	
Numero anni			10	10	
		162	162	162	162
		6	8	10	12

Fig. 3.6.1. Screen-shot della sezione del foglio TECNOLOGIE riguardante i generatori di calore a caldaia.

- **Pompe di calore**

Per i dati generali ci si può riferire a quanto detto per le caldaie. I dati specifici delle pompe di calore riguardano la potenza termica e frigorifera installata, i coefficienti di prestazione invernale (COP) ed estivo (EER), la percentuale di eventuale recupero di energia dal condensatore in estate e dall'evaporatore in inverno da utilizzare in processi separati, tipicamente per la produzione di acqua calda sanitaria estiva e/o per la refrigerazione invernale.

I coefficienti di prestazione possono anche essere inseriti con dettaglio mensile, così come indicato dalla norma UNI TS 11300 -3.

E' prevista la possibilità di inserire pompe di calore di ogni tipologia, sia ad aria che geotermiche, sia per la climatizzazione che per il riscaldamento dell'acqua sanitaria.

- **Solare termico**

Anche in questo caso i dati generali sono simili a quanto già detto. I dati specifici riguardano invece la superficie dei collettori solari, il rendimento invernale ed estivo dei collettori ed i valori mensili di irraggiamento incidente. In questa prima versione del software l'irraggiamento va inserito manualmente in base all'esatto tilt e azimuth dei pannelli. Esistono applicazioni web molto affidabili, veloci ed interessanti che effettuano tale calcolo, come per esempio PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>).

E' prevista la possibilità di utilizzare il solare termico sia per il solo riscaldamento dell'acqua sanitaria che per il condizionamento.

### 3.6.2 **Generazione termica ed elettrica**

Fanno parte di questa categoria i sistemi in grado di produrre contemporaneamente sia energia elettrica che termica.

- **Cogeneratori**

Ancora una volta si rimanda alla descrizione delle caldaie per l'inserimento dei dati generali. I dati specifici riguardano essenzialmente la potenza elettrica e termica installate, i rispettivi rendimenti, nonché un fattore di contemporaneità tra produzione e consumi elettrici. Quest'ultimo parametro è importante poiché il cogeneratore, come di norma, viene esercito ad "inseguimento termico", perciò la produzione elettrica potrebbe non essere contemporanea ai consumi, con tutto ciò che ne consegue a livello di economico.

E' prevista la possibilità di utilizzare il cogeneratore sia per il solo riscaldamento dell'acqua sanitaria che per il condizionamento.

- **Trigeneratori**

Il trigeneratore viene modellato in modo simile al cogeneratore, con la differenza che occorre inserire anche il rendimento estivo del sistema ad assorbimento.

### 3.6.3 **Generazione solo elettrica**

Fanno parte di questa categoria i sistemi in grado di produrre esclusivamente energia elettrica. L'unico sistema di questo tipo attualmente modellato è il fotovoltaico.

- **Fotovoltaico**

Per ciò che concerne il fotovoltaico non vi sono molte differenze concettuali rispetto alla modellazione del solare termico. Le differenze riguardano l'inserimento del valore di potenza di picco installata, l'inserimento dei valori di produzione giornaliera anziché l'irraggiamento e l'introduzione del coefficiente di contemporaneità produzione/consumi necessario a stimare la quota di energia auto-consumata. Vi è poi una sezione riguardante l'incentivazione in conto energia, specifica del fotovoltaico.

### **3.7 Modellazione della zona di calcolo nella configurazione *baseline***

Una volta definite tutte le tecnologie che si intenderà utilizzare (Ved. Par. 3.5 e 3.6), è possibile iniziare a modellare la zona di calcolo specifica descritta da ogni singolo file. Nel definire tale zona vi sono alcuni parametri generali costanti (foglio EDIFICI) che riguardano essenzialmente la localizzazione geografica e la preesistenza dell'edificio. Vi sono poi i dati specifici per ogni configurazione. Come già menzionato nel paragrafo 3.3, il foglio "CALCOLO (Baseline)", contiene i dati della configurazione di base che sarà il parametro di riferimento per tutte le altre configurazioni che verranno descritte nei vari fogli "CALCOLO (Sol.1)", "CALCOLO (Sol.2)" e così via. In questo paragrafo si descrive come impostare i dati generali costanti e quelli presenti sul foglio di base.

#### **3.7.1 Impostazione dei dati generali costanti (foglio EDIFICI)**

Il primo dato richiesto riguarda la denominazione della zona di calcolo. Ciò sarà necessario nel caso in cui si modellassero più zone di calcolo (su diversi file) come riferimento univoco della zona.

Nel campo descrizione è possibile fornire una descrizione testuale libera della zona di calcolo considerata.

Nel campo "localizzazione" è invece necessario indicare il comune nel quale si trova la costruzione. Archi-Energy caricherà automaticamente i dati geografici e climatici della zona secondo quanto riportato sulla norma UNI 10349.

Nel campo "preesistenza" è necessario definire se si sta eseguendo un calcolo su una nuova costruzione o su un edificio esistente. In questo modo è possibile valutare differenzialmente i costi di intervento.

E' poi necessario specificare la destinazione d'uso della zona termica (residenziale o non residenziale) poiché da essa dipendono gli indici energetici che per la prima sono riferiti all'unità di superficie e nella seconda all'unità di volume. Nella casella successiva è necessario inserire la tipologia specifica di attività. Nel caso di residenziale occorre ripetere la dicitura "residenziale".

Al di sotto dei dati appena inseriti sono presenti delle celle nascoste in cui sono riportati i valori specifici delle temperature esterne della località considerata. Nel caso in cui si voglia consultarle basta espandere le righe cliccando sul simbolo '+' a sinistra.

### **3.7.2 Impostazione della configurazione di base (foglio CALCOLO)**

La configurazione di base va compilata nel foglio di calcolo "CALCOLO (Baseline)". Questo è strutturato secondo tre macro-sezioni, a loro volta suddivise in sotto-sezioni secondo il seguente schema:

#### **Sezione CONFIGURAZIONI**

1. GESTIONE ED UTILIZZO
2. CARATTERIZZAZIONE DELL'INVOLUCRO
3. CONFIGURAZIONE DEGLI IMPIANTI

#### **Sezione FABBISOGNI NETTI**

4. SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE
5. SCAMBIO TERMICO PER VENTILAZIONE
6. APPORTI TERMICI INTERNI
7. APPORTI TERMICI SOLARI
8. FABBISOGNO DI ENERGIA NETTA PER CLIMATIZZAZIONE
9. FABBISOGNO DI ENERGIA NETTA PER ACQUA CALDA SANITARIA
10. FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA

**Sezione BILANCI ENERGETICI**

1. BILANCIO CLIMATIZZAZIONE
2. BILANCIO ACQUA CALDA SANITARIA
3. BILANCIO ENERGIA ELETTRICA

**Sezione RISULTATI**

1. PROSPETTO CONSUMI
2. PROSPETTO IMPIANTI
3. PROSPETTO INDICI AMBIENTALI E PRESTAZIONALI
4. PROSPETTO FLUSSI ECONOMICI
5. PROSPETTO INVESTIMENTI
6. PROSPETTO ANALISI ECONOMICO/FINANZIARIA

L'utente deve procedere all'inserimento di dati esclusivamente nella prima sezione, le altre riguardano i calcoli che svolge autonomamente il programma ed i risultati finali. Si procede ad una descrizione delle diverse sezioni.

**3.7.3 Sezione "CONFIGURAZIONI" del foglio "CALCOLO"****1. Sotto-sezione GESTIONE ED UTILIZZO**

La prima sotto-sezione ("GESTIONE ED UTILIZZO") della macro-sezione "CONFIGURAZIONI" riguarda l'impostazione dei dati riguardanti la gestione e l'utilizzo degli ambienti oggetti di calcolo. Essa si suddivide ulteriormente nei punti descritti in seguito.

**1.1 Utilizzo struttura**

I primi dati da inserire riguardano la definizione delle ore di attività della struttura analizzata. Per "ore di attività" si intende quel periodo in cui la zona di calcolo è effettivamente occupata e gli impianti sono attivi a set-point di comfort. Una

volta inseriti gli orari di attività Archi-Energy calcola automaticamente le ore di attività.

**Nota importante:** Per l'attuale formulazione del modello le ore di attività devono essere prevalentemente diurne poiché in queste ore vengono inseriti tutti i carichi termici solari. Quindi, in presenza di edifici attivi prevalentemente di sera o di notte, occorre ricondursi al metodo normativo considerando un periodo di attività pari alle 24 ore. Tale limitazione potrà essere superata nelle prossime versioni del software.

Se sono presenti giorni in cui la struttura analizzata rimane completamente non funzionante (es. il weekend o le ferie per un edificio del terziario), allora questi vanno inseriti, mese per mese, nella casella "*Giorni al mese di non funzionamento struttura*" (es. per 4 weekend al mese più un giorno festivo infra-settimanale va inserito 9). Nelle successive caselle "*Numero di interruzioni lunghe ogni mese*" va invece inserito il numero di volte in cui si verificano le interruzioni (es. per 4 weekend al mese più un giorno festivo infra-settimanale va inserito 5).

Nelle ultime due caselle vanno invece inseriti i dati riguardanti l'occupazione delle persone durante i periodi di attività e quelli di non attività.

**CALCOLO**

**CONFIGURAZIONI**

**1 GESTIONE ED UTILIZZO**

**1.1 Utilizzo struttura**

Ora di inizio attività struttura: 8:00 [hh:mm]  
 Ora di fine attività struttura: 18:00 [hh:mm]  
 Ore/giorno di attività struttura: 8.00

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT
Giorni al mese [g]	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Giorni al mese di non funzionamento struttura [g]	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	48
Giorni al mese di attività [g]	27	24	27	26	27	26	27	27	26	27	26	27	317
Numero di interruzioni lunghe ogni mese [numero]	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	48
Ore di attività annuali della struttura	7808 ore												
Occupazione di persone durante l'attività	0.0 persone/100mq												
Occupazione di persone fuori dall'attività	0.0 persone/100mq												

**1.2 Climatizzazione invernale**

Set-point e periodi:  
 Temperatura di set-point a piena potenza (Fh\_set1): 20° C  
 Temperatura di set-point a potenza ridotta (Fh\_set2): 13° C  
 Inizio stagione riscaldamento: 15/11 [gg/mm]  
 Fine stagione riscaldamento: 01/04 [gg/mm]  
 Giorni di riscaldamento teorici: 137 giorni  
 di cui: 90 giorni a inizio anno, 47 giorni a fine anno

**1.3 Climatizzazione estiva**

Set-point e periodi:  
 Temperatura di set-point a piena potenza (Fo\_set1): 26° C  
 Temperatura di set-point a potenza ridotta (Fo\_set2): Non implementato  
 Inizio stagione raffrescamento: 01/04 [gg/mm]  
 Fine stagione raffrescamento: 15/11 [gg/mm]  
 Giorni di raffrescamento teorici: 228 giorni

**1.4 Carichi interni**

Livello di attività delle persone = 50 W/sensibili/persona, 50 W/latenti/persona

	Sensibili		Latenti		Totali	
	[W/m²]	[kW]	[W/m²]	[kW]	[W/m²]	[kW]
Carichi delle persone a livello 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Carichi delle persone a livello 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Carichi interni a livello 1	1.5	0.5	0.0	0.0	1.5	0.5
Carichi interni a livello 2	1.5	0.5	0.0	0.0	1.5	0.5
<b>TOTALE Livello 1</b>	<b>1.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1.5</b>	<b>0.5</b>
<b>TOTALE Livello 2</b>	<b>1.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1.5</b>	<b>0.5</b>

**1.5 Ventilazione**

	dall'ESTERNO				da SPAZI NON CLIMATIZZATI				TOTALE			
	Invernale		Estiva		Invernale		Estiva		Invernale		Estiva	
	[Vol/h]	[m³/h]	[Vol/h]	[m³/h]	[Vol/h]	[m³/h]	[Vol/h]	[m³/h]	[Vol/h]	[m³/h]	[Vol/h]	[m³/h]
Numero medio ricambi orari a livello 1	0.3	257	0.5	555	0.0	0	0.0	0	0.3	257	0.5	555
Numero medio ricambi orari a livello 2	0.3	257	0.5	555	0.0	0	0.0	0	0.3	257	0.5	555
Numero medio ricambi orari free-cooling	0.0	0	0.5	555					0.0	0	0.5	555

	Invernale		Estiva	
	G. attività	G. nn attività	G. attività	G. nn attività
Periodo a set-point 1 (T <sub>set,1</sub> ) [h/giorno] =	8	0	8	0
Periodo a set-point 2 (T <sub>set,2</sub> ) [h/giorno] =	16	24	0	8
Periodo a set-point 3 (T <sub>set,3</sub> ) [h/giorno] =	0	0	16	16

**1.6 Illuminazione**

Livello di illuminamento medio richiesto a livello 1 [Lux] =   
 Livello di illuminamento medio richiesto a livello 2 [Lux] =

Fig. 3.7.1. Screen-shot della sezione del foglio CALCOLO riguardante i dati di utilizzo, i parametri di climatizzazione invernale ed estiva, i valori dei carichi interni ed i livelli di ventilazione.



### 1.2 Climatizzazione invernale

In questo punto vanno inseriti i dati riguardanti la stagione di riscaldamento. Essi comprendono il valore delle temperature regolate nei locali durante i periodi di attività (set-point 1) e durante le interruzioni (set-point 2). Comprendono inoltre la definizione della stagione di riscaldamento convenzionale.

**Nota importante:** A causa dei formati di data gestiti da Excel è necessario inserire la data di inizio stagione e di fine stagione appartenenti al medesimo anno (sebbene tale informazione sia del tutto superflua ai fini del calcolo).

In base ai dati inseriti il software calcola i giorni complessivi di riscaldamento nonché la parte di giorni che riguarda l'inizio dell'anno (dal 1° gennaio alla primavera) e la parte che riguarda la fine (dall'autunno al 31 dicembre).

E' inoltre presente una parte nascosta (visualizzabile cliccando sul simbolo '+' a sinistra), in cui vengono calcolati una serie di altri dati meno importanti per l'utente, ma indispensabili al software per i calcoli, che riguardano la definizione esatta dei periodi di attività/non attività e i salti termici effettivi.

### 1.3 Climatizzazione estiva

In questo punto vanno inseriti i dati riguardanti la stagione di raffrescamento. In questo caso è necessario inserire solo la temperatura regolata nei locali durante i periodi di attività (set-point 1), infatti non è previsto il funzionamento a set-point ridotti. Per quanto riguarda la definizione della stagione di raffrescamento, essa viene calcolata automaticamente come complementare a quella di riscaldamento. In ogni caso il raffrescamento comincia effettivamente a funzionare solo quando il bilancio termico è tale da necessitare una rimozione di energia termica, quindi tipicamente da metà primavera fino a metà autunno.

E' inoltre presente una parte nascosta (visualizzabile cliccando sul simbolo '+' a sinistra), in cui vengono calcolati una serie di altri dati meno importanti per l'utente, ma indispensabili al software per i calcoli, che riguardano la definizione esatta dei periodi di attività/non attività e i salti termici effettivi.

#### 1.4 Carichi interni

In questo punto vanno inseriti i dati riguardanti i carichi interni dovuti alle persone ed alle apparecchiature presenti nei locali. Tali carichi si considerano differenti per i periodi di attività (livello 1) e quelli di non attività (livello 2), ma costanti per tutti i mesi dell'anno.

Per quanto riguarda le persone è sufficiente inserire il valore del carico pro-capite (esso viene moltiplicato per la densità di occupazione già inserita), mentre per gli altri carichi si può inserire direttamente il valore in  $W/m^2$  che verrà moltiplicato per la superficie utile della zona termica.

Il software permette l'inserimento di carichi sia sensibili che latenti, sebbene al momento questi ultimi non siano utilizzati nel calcolo poiché il bilancio termico realizzato considera solo i carichi sensibili.

#### 1.5 Ventilazione

Vanno qui inseriti i dati riguardanti i livelli di ricambio d'aria presenti nella zona termica. I valori sono differenziati per i diversi periodi di funzionamento e per le stagioni.

Nella stagione invernale sono previsti due set-point: quello per le ore di attività (livello 1) e quello per le altre ore (livello 2).

Nella stagione estiva sono presenti invece tre livelli: quello per le ore di attività (livello 1), quello per le ore di non attività dei giorni di funzionamento (tipicamente le ore notturne dei giorni lavorativi, livello *free-cooling*) e quello per le altre ore (livello 2). Il livello *free-cooling* tiene in considerazione la possibilità di effettuare una ventilazione notturna degli spazi sfruttando la temperatura esterna inferiore per abbattere il carico termico interno residuo. La ventilazione, inoltre, può avvenire con aria esterna oppure con aria proveniente da spazi non climatizzati.

I valori da specificare si riferiscono sempre al numero di ricambi orari del volume interno netto.

## **2. Sotto-sezione CARATTERIZZAZIONE DELL'INVOLUCRO**

La seconda sotto-sezione della macro-sezione "CONFIGURAZIONI" riguarda l'impostazione dei dati riguardanti la definizione delle caratteristiche geometrico/termiche dell'involucro. Essa si suddivide ulteriormente nei punti descritti in seguito.

### **2.1 Dimensioni generali**

In questo punto l'utente può inserire i dati geometrici generali della zona di calcolo. Essi riguardano le superfici in pianta (lorda e netta), le quote, l'altezza media dell'interpiano, nonché dati riguardanti la definizione della massa dell'edificio e della sua capacità termica. Riguardo a questi ultimi si adotta la metodologia proposta dalla norma UNI TS 11300-1 per il calcolo della massa superficiale delle strutture. Questa viene poi moltiplicata per il valore di area superficiale delle strutture interessate fornito dall'utente.

E' inoltre presente una parte nascosta (visualizzabile cliccando sul simbolo '+' a sinistra), in cui vengono calcolati una serie di altri dati meno importanti per

l'utente, ma indispensabili al software per i calcoli, che riguardano i coefficienti di scambio termico globali nei vari periodi nonché le costanti di tempo termiche. Questi valori sono il risultato di calcoli effettuati più avanti nel software.

## 2.2 Superfici disperdenti

In questa zona è possibile inserire i dati specifici dei componenti dell'involucro, costruendo il modello termico vero e proprio della zona di calcolo.

Per prima cosa è necessario inserire il valore delle conduttanze superficiali esterna ed interna (anche detti coefficienti di adduzione) che verranno utilizzati per tutte le pareti confinanti con l'interno e con l'esterno. I valori inseriti sono quelli tipici consigliati dalla normativa.

Occorre poi inserire l'emissività media infrarossa delle superfici esterne (necessaria per il calcolo della radiazione infrarossa verso la volta celeste) e il fattore di incremento percentuale delle dispersioni a causa dei ponti termici (utilizzato nei calcoli della trasmissione verso l'esterno e verso il terreno).

A questo punto è necessario compilare la tabella delle superfici disperdenti. Ogni riga della tabella riguarda una superficie disperdente. Non sono quindi da riportare le pareti non disperdenti (es. tramezzi o pareti confinanti con spazi riscaldati alla medesima temperatura).

Le prime quattro colonne riguardano esposizione e confini ed in particolare:

- “Confine” indica lo spazio confinante dall’altro lato della parete. Gli spazi possibili sono tre: esterno, spazio non climatizzato e terreno.
- “Spazio non clima” permette di specificare la tipologia di spazio non climatizzato se è stato selezionato “spazio n. clima” nel menu precedente. Le scelte disponibili dipendono dagli spazi descritti nel foglio “TECNOLOGIE”.
- “Esposiz.” indica l’orientamento della parete, le scelte possibili sono otto per le pareti verticali: N, NE, E, SE, S, SO, O, NO, mentre per le pareti orizzontali è disponibile solo la scelta “OR” quale che sia la tipologia di copertura o l’inclinazione della falda del tetto.
- “Esp. terreno” indica una precisazione sulla tipologia di contatto col terreno, in particolare se si tratta di contatto diretto oppure di contatto mediato da un’intercapedine d’aria. Ciò influisce sul coefficiente di scambio termico.

Le successive cinque colonne definiscono i componenti opachi e trasparenti dell’involucro, in particolare:

- “Compon. opachi lordi” definisce la tipologia e la superficie dei componenti opachi. Le tipologie disponibili sono quelle inserite nel foglio “TECNOLOGIE” e sono quindi personalizzabili. La superficie da immettere è quella esterna lorda vuoto per pieno, cioè includendovi anche la superficie di eventuali vetrate.
- “Compon. vetrati” definisce la tipologia e la superficie dei componenti vetrati. Le tipologie disponibili sono quelle inserite nel foglio “TECNOLOGIE” e sono quindi personalizzabili. La superficie da immettere è quella esterna lorda della finestra, comprendente anche il telaio.
- “Compon. opachi netti” rappresenta la superficie netta dei componenti opachi, ottenuta sottraendo la superficie vetrata a quella opaca lorda.

Le successive sette colonne sono tutte dedicate alla descrizione degli ombreggiamenti che insistono sui componenti esposti alla radiazione solare. In particolare:

- “Ostruz. Orizz.” permette di inserire una delle tipologie di ostruzioni orizzontali indicate sul foglio “TECNOLOGIE”, definendone anche una presenza percentuale. Tale valore rappresenta il rapporto tra la superficie interessata dall’ombreggiamento e quella completamente libera indicata nelle colonne a sinistra. Ciò è utile per modellare ostruzioni parziali, come ad esempio alberi, tende o altri oggetti che proiettano la loro ombra solo su una zona ridotta dell’intera superficie.
- “Aggetti” permette di inserire le due tipologie di aggetto: quello verticale e quello orizzontale, prendendole sempre dall’archivio nel foglio “TECNOLOGIE”. Anche in questo caso è possibile indicare una presenza percentuale, riferita ad entrambi gli aggetti.
- “Altro” consente di modellare la presenza di ombreggiamenti diversi da quelli appena descritti, calcolati per esempio mediante software esterni. Anche in questo caso è possibile indicarne la presenza percentuale.

L’ultima colonna è riservata ad una descrizione testuale del componente appena descritto, per specificarne a parole le caratteristiche peculiari.

Al di sotto della tabella è presente un’ampia parte nascosta di quasi 1000 righe (visualizzabile cliccando sul simbolo ‘+’ a sinistra), che è necessaria al programma per associare alle superficie disperdenti i relativi parametri presenti sul foglio “TECNOLOGIE”, nonché a suddividere tali superfici a seconda dell’esposizione e dei confini ed effettuare alcuni calcoli. In particolare è presente una tabella iniziale nella quale vengono riportate le superfici disperdenti inserite e tutti i parametri del foglio “TECNOLOGIE”. Dopo di essa sono presenti quattro gruppi di tabelle. Il primo gruppo riguarda le superfici opache che confinano con l’aria

esterna e si compone di nove tabelle ciascuna relativa ad una diversa esposizione. In esse vengono riportati i dati termici e geometrici di ciascuna superficie nonché vengono effettuati i calcoli relativi a irraggiamento ed ombreggiamento. Il secondo gruppo riguarda le superfici vetrate che confinano con l'aria esterna e si compone di nove tabelle ciascuna relativa ad una diversa esposizione. Anche in questo caso vengono riportati i dati termici e geometrici di ciascuna superficie nonché vengono effettuati i calcoli relativi a irraggiamento ed ombreggiamento. Il terzo gruppo riguarda le superfici trasparenti e vetrate che confinano con non climatizzati. Esso si compone di nove tabelle ciascuna relativa ad una diversa esposizione della faccia di confine. I calcoli effettuati per queste superfici sono più complessi perché coinvolgono la modellazione descritta al paragrafo 2.11. L'ultimo gruppo riguarda invece le superfici confinanti col terreno. Non essendoci necessità di distinguere le esposizioni, questo gruppo si compone di una sola tabella. Anche in questo caso vengono riportati i dati termici e geometrici di ciascuna superficie nonché vengono effettuati i calcoli relativi a irraggiamento ed ombreggiamento.

### 2.3 Riepilogo dati geometrici

L'ultima parte della sotto-sezione "CARATTERIZZAZIONE DELL'INVOLUCRO" contiene una semplice tabella riepilogativa delle superfici inserite al punto 2.2 divise per esposizione e per confine.

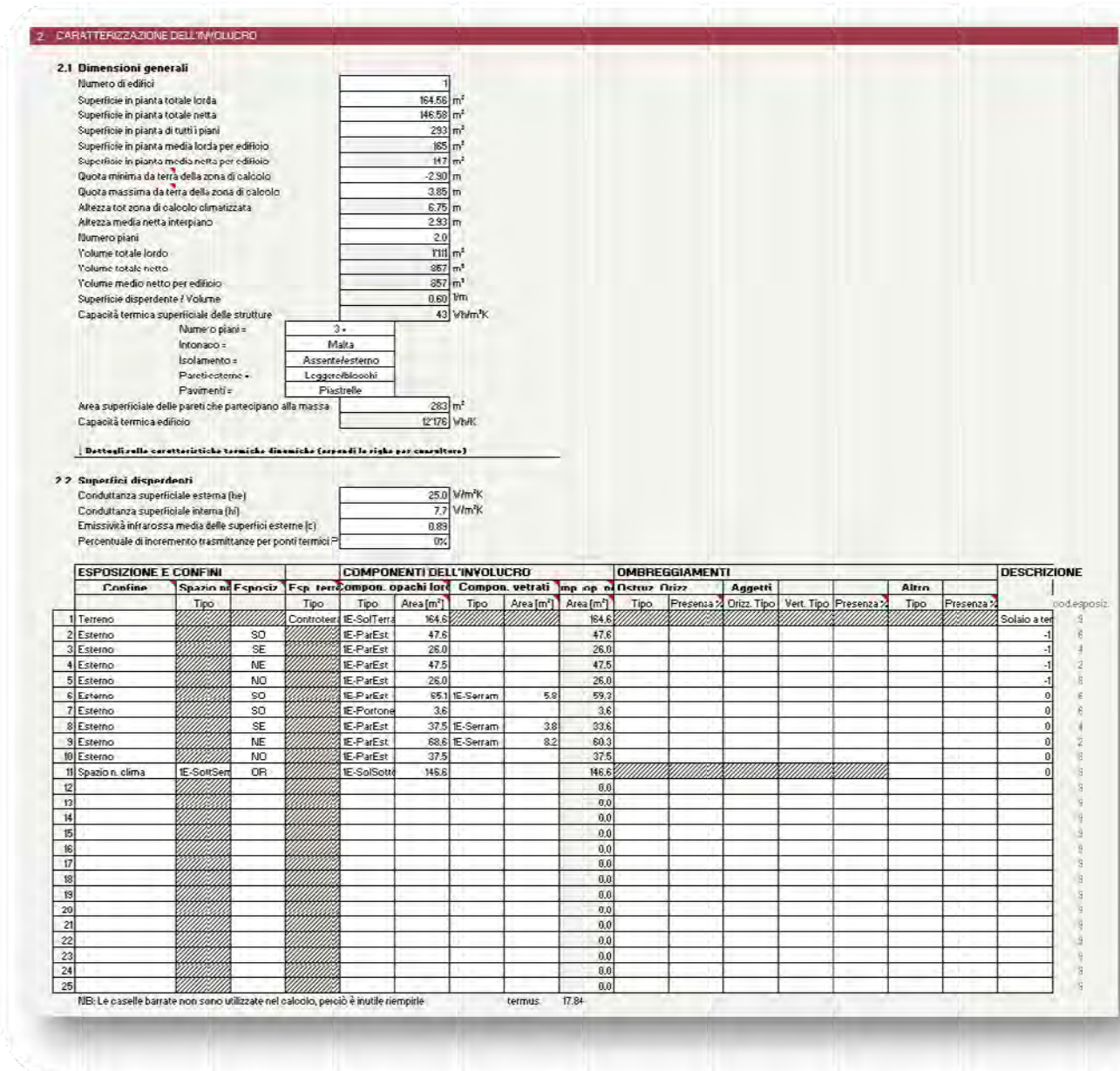


Fig. 3.7.2. Screen-shot della sezione del foglio "CALCOLO" riguardante i dati dell'involucro edilizio.



### 3. Sotto-sezione CONFIGURAZIONE DEGLI IMPIANTI

La terza sotto-sezione della macro-sezione “CONFIGURAZIONI” riguarda la definizione del mix impiantistico utilizzato. Gli impianti considerati riguardano sia la produzione di calore (riscaldamento a acqua calda), sia la rimozione di calore (raffrescamento), sia la produzione di energia elettrica, sia la produzione combinata di calore ed energia elettrica (cogenerazione). L’utente inserisce le caratteristiche degli impianti effettivamente presenti per poi gestirne le logiche di funzionamento.

#### 3.1 CALDAIA 1 per RISCALDAMENTO (alta priorità)

Il primo impianto inseribile è composto da una caldaia adibita a generazione di calore per riscaldamento, alimentata a combustibili rinnovabili e con priorità di accensione rispetto alla caldaia 2 (di cui al punto 3.2). Tale modello è pensato per l’introduzione di caldaie alimentate a biomassa oppure altri combustibili rinnovabili, che, utilizzando energia rinnovabile, devono essere esercite in modo prioritario rispetto alle altre caldaie alimentate con combustibili fossili.

Nella definizione dell’impianto l’utente può agire su vari parametri. Il più importante riguarda la definizione del tipo di caldaia. La scelta è relativa alle tipologie inserite dall’utente nel foglio “TECNOLOGIE”. Il secondo parametro fondamentale riguarda la potenza termica utile installata. Questa influenza la massima potenza ed energia erogabile dalla caldaia nonché il suo rendimento. Il valore può essere noto a priori (per esempio in base alla disponibilità di biomassa) oppure ricavato per tentativi analizzando i risultati del calcolo e quindi la capacità della caldaia di far fronte effettivamente alla richiesta energetica. In quest’ultimo caso va sottolineato che è necessario sovradimensionare la caldaia in quanto essa deve soddisfare anche i picchi di fabbisogno. Il fattore di sovradimensionamento andrebbe calcolato in base al carico massimo, ma può essere stimato conservativamente pari a circa 2.

In base ai dati inseriti il software calcola automaticamente i valori di rendimento dei sotto-sistemi nonché il rendimento globale stagionale dell'intero impianto. I calcoli effettuati sono conformi alla norma UNI TS 11300-1 e sono visionabili espandendo la zona nascosta.

Nell'area COSTI sono visualizzati i costi relativi all'impianto installato, calcolati a partire dai dati di costo del foglio "TECNOLOGIE" e dalla potenza installata. Nell'area BENEFICI ECONOMICI sono invece riportati i ricavi derivanti dalla due possibili incentivazioni (se applicabili) per titoli di efficienza energetica (certificati bianchi) e per detrazione fiscale.

Al di sotto della tabella è presente un'area nascosta (visualizzabile cliccando sul simbolo '+' a sinistra), che è necessaria al programma per calcolare il rendimento dei sottosistemi, i valori di costo e di beneficio economico nonché i dati di dettaglio sul funzionamento del generatore. A questo riguardo l'ultima tabella riporta la massima energia erogabile dal generatore nei vari periodi e quella effettivamente erogata sulla base del funzionamento effettivo. Vengono quindi calcolati l'energia primaria utilizzata, la quantità di combustibile e la relativa spesa di acquisto.

**3.1 CALDAIA 1 per RISCALDAMENTO (alta priorità)**

**DATI GENERALI E PRESTAZIONI**

Caratteristica generale (fissa)

Tipo: **BiomCentralizz**

Descrizione: **Caldaia a biomassa per condominio**

Combustibile: **Pellet**

Potenza termica utile installata (Pn): **35.0 kWt**

Rendimento generazione ( $\eta_{g,cal}$ )	77.0%
Rendimento emissione ( $\eta_{e,cal}$ )	80.0%
Rendimento regolazione ( $\eta_{r,cal}$ )	83.1%
Rendimento distribuzione ( $\eta_{d,cal}$ )	92.5%
<b>Rendimento globale (<math>\eta_{g,cal}</math>)</b>	<b>53.9%</b>

**COSTI**

Costo investimento:  Euro =  Euro/kW

Costo annuale manutenzione:  Euro =  Euro/kW

**BENEFICI ECONOMICI**

Ricavo da certificati bianchi:  Euro =  Euro/anno per  anni

Ricavo da detrazione fiscale:  Euro =  Euro/anno per  anni

Calcoli specifici sul generatore di calore (appendila rigo per consultare)

Fig. 3.7.3. Screen-shot della sezione del foglio "CALCOLO" riguardante i dati della caldaia 1 per climatizzazione.

### 3.2 CALDAIA 2 per RISCALDAMENTO (bassa priorità)

Il secondo impianto preso in considerazione è una seconda caldaia, sempre adibita a riscaldamento dei locali, ma alimentata a combustibili fossili e con priorità inferiore alla caldaia 1. Tale modello è pensato per l'introduzione di caldaie alimentate a combustibili fossili (quali gas, GPL, gasolio, ecc) che, utilizzando energia non rinnovabile, devono essere esercite sono come backup agli eventuali altri sistemi a fonte rinnovabile.

Tutti i parametri da inserire sono identici a quelli della "caldaia1", perciò per la loro spiegazione ci si può riferire ad essa.

Per maggiori informazioni si può consultare il paragrafo 2.13.

### 3.3 POMPA DI CALORE per CLIMATIZZAZIONE

Si tratta di una generica pompa di calore ad alimentazione elettrica che può essere modificata per adattarla a qualsiasi tipologia esistente. La pompa di calore è esercita dal software con priorità maggiore rispetto alla caldaia a combustibili fossili e al cogeneratore, ma minore rispetto alle energie rinnovabili.

Per maggiori informazioni si può consultare il paragrafo 2.13.

### 3.4 CALDAIA 1 per ACQUA CALDA SANITARIA (alta priorità)

Si tratta di una caldaia per il riscaldamento dell'acqua sanitaria. La modellazione è del tutto simile a quanto già detto al punto 3.1. E' possibile che la caldaia del punto 3.1 e questa siano la stessa macchina. In questo caso è sufficiente inserire correttamente i valori di potenza, costo e rendimento in modo tale che non vi siano discrepanze sostanziali. Per esempio per una caldaia domestica che svolge entrambi i compiti sarà necessario inserire in 3.1 e 3.3 la medesima potenza (pari alla potenza nominale) ed il medesimo rendimento di produzione, mentre il costo dovrà essere valutato chiaramente una volta sola e quindi inserito solo su una delle due o suddiviso tra le due.

Per maggiori informazioni si può consultare il paragrafo 2.13.

### 3.5 CALDAIA 2 per ACQUA CALDA SANITARIA (bassa priorità)

Si tratta di una seconda caldaia per il riscaldamento dell'acqua sanitaria alimentata a combustibili fossili. Vale quanto già asserito al punto 3.2.

Per maggiori informazioni si può consultare il paragrafo 2.13.

### 3.6 POMPA DI CALORE per ACQUA CALDA SANITARIA

Si tratta di una generica pompa di calore ad alimentazione elettrica che può essere modificata per adattarla a qualsiasi tipologia esistente, per il riscaldamento dell'acqua sanitaria. In questo caso la pompa di calore è prioritaria solo alla caldaia a combustibili fossili. Il cogeneratore è prioritario rispetto alla pompa di calore poiché viene valutato come una tecnologia più adatta alla produzione di calore ad alta temperatura.

Per maggiori informazioni si può consultare il paragrafo 2.13.

### 3.7 SOLARE TERMICO

Il solare termico, essendo energia completamente rinnovabile, ha chiaramente priorità rispetto a tutte le altre fonti termiche. L'utilizzo del calore prodotto è utilizzato in via prioritaria per il soddisfacimento del fabbisogno di acqua calda sanitaria. Nel caso in cui la produzione sia sovrabbondante allora si sfrutta anche per il riscaldamento.

Per maggiori informazioni si può consultare il paragrafo 2.13

### 3.8 SOLARE FOTOVOLTAICO

Il solare termico, essendo energia completamente rinnovabile, ha chiaramente priorità rispetto a tutte le altre fonti elettriche. L'energia prodotta può essere consumata direttamente sul posto se la produzione è contestuale ai fabbisogni, oppure può essere immesso in rete. Nel calcolo economico vengono valutate differentemente le due quote a seconda del regime commerciale prescelto.

Per maggiori informazioni si può consultare il paragrafo 2.13.

### 3.9 COGENERAZIONE

La cogenerazione è concepita in Archi-Energy prioritariamente per la produzione di acqua calda sanitaria. Se la produzione è sovrabbondante (o se l'acqua sanitaria è già ampiamente coperta dal solare termico) allora il calore viene utilizzato anche per il riscaldamento. L'energia elettrica è, in questo caso, un sottoprodotto che segue la produzione termica. Essa come, quella prodotta dal fotovoltaico, può essere auto consumata sul posto o essere ceduta alla rete.

Per maggiori informazioni si può consultare il paragrafo 2.13.

#### 3.7.4 **Sezione “FABBISOGNI NETTI” del foglio “CALCOLO”**

In questa sezione è racchiusa la maggior parte dei calcoli del programma, tutti espliciti mediante la trascrizione delle formule utilizzate, coerentemente a quanto descritto al capitolo 2. Le sotto-sezioni riguardano i seguenti argomenti:

4. Scambio termico per trasmissione;
5. Scambio termico per ventilazione;
6. Apporti termici interni;
7. Apporti termici solari;
8. Fabbisogno di energia netta per climatizzazione;
9. Fabbisogno di energia netta per acqua calda sanitaria;
10. Fabbisogno di energia elettrica.

Si riporta la descrizione di ogni sotto-sezione.

#### **4. Sotto-sezione SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE**

La prima sotto-sezione della macro-sezione “FABBISOGNI NETTI” riguarda il calcolo dello scambio termico per trasmissione secondo le due metodologie: normativa e alternativa descritte ai paragrafi 2.1 e 2.2.

##### 4.1 Coefficienti di scambio termico per trasmissione

Il punto 4.1 è dedicato al calcolo dei coefficienti di scambio termico relativi ai flussi di calore che transitano per trasmissione dallo spazio interno verso gli altri spazi.

Il primo calcolo (4.1.1) riguarda il coefficiente di trasmissione verso l'esterno. Vengono quindi riportati in tabella i valori cumulati delle superfici opache e trasparenti per le diverse esposizioni coi relativi valori di trasmittanza termica. Viene quindi calcolato il coefficiente di scambio termico per ogni esposizione, incrementato della quota percentuale dovuta ai ponti termici.

Il secondo calcolo (4.1.2) riguarda il coefficiente di trasmissione verso il terreno. In questo caso, non essendo importanti le esposizioni e non essendo presenti superfici vetrate, la tabella riporta semplicemente la superficie cumulata, la trasmittanza termica, il valore del coefficiente correttivo della temperatura (di cui al par 2.5), il valore dell'incremento percentuale per ponti termici e quindi il valore finale del coefficiente di scambio termico.

Il terzo calcolo (4.1.3) riguarda il coefficiente di trasmissione verso locali non climatizzati. I locali presi in considerazione sono quelli descritti al paragrafo 2.5. La tabella finale riporta nelle prime colonne i dati delle pareti di separazione,

seguiti dal coefficiente di correzione  $b_{tr}$  dovuto allo spazio non climatizzato, ed infine riporta il valore del coefficiente di scambio termico risultante.

Il quarto calcolo (4.1.4) è invece un'aggregazione dei diversi coefficienti di scambio termico già calcolati.

Il quinto calcolo (4.1.5) è relativo all'extra-flusso dovuto alle perdite per irraggiamento infrarosso. La tabella riporta i dati di calcolo così come indicati dalla norma UNI TS 11300-1 e calcola il flusso termico istantaneo per le superfici alle diverse esposizioni.

**4.1.4 RISULTATO: Coefficienti di scambio termico per trasmissione (Htr)**  
 $H_{tr, tot} = H_{tr, ext} + H_{tr, terr} + H_{tr, non\ risc} + H_{tr, zone}$  *Coeff. scambio per trasmissione corretto in base alla temperatura di scambio = diretta verso l'esterno + verso terra + verso spazi non risc. + verso zone adiacenti*  
*ipotesi:  $H_{tr, adj} = 0$*

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT
Nord													
Nord/Est	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	1265
Est													
Sud/Est	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	673
Sud													
Sud/Ovest	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	1213
Ovest													
Nord/Ovest	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	568
Orizzontale	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	497
A terra	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	1449
<b>TOTALE</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>472</b>	<b>5685</b>

114 257 (UNITS 11300-111.4, UNI 0790 113.5)

**4.1.5 Extra-flusso di radiazione infrarossa verso la volta celeste**  
 $\sum_k F_{r, k} \Phi_{r, med, k}$   
 dove:  $F_r = F_{r, ob, dif} (1 + \cos S) / 2$  *Fattore di forma del componente edilizio. Fsh, ob, dif = fattore di ombreggiamento e radiazione diffusa. S = angolo del componente sull'orizzontale*  
 $\Phi_{r, med} = R_{se} U_{se} A_{se} h_{se} \Delta T_{se}$  *Extra flusso termico = Res. Sup. Est. \* Trasmitt \* Area \* Coeff. Radiativo \* Differenza media di temp.*

Res. superficiale esterna (Rse)	0.04	m <sup>2</sup> /K
Emissività infrarossa media (ε)	0.89	
Coeff. di scambio termico radiativo (hr)	4.45	W/m <sup>2</sup> /K (Val. casuale UNI TS 11300-111.4)
Diff. temper. parete-cielo	11.0	K (Val. casuale UNI TS 11300-111.4)

	Atot [m <sup>2</sup> ]	Fsh, ob, dif [%]	S [°]	Fr [%]	U <sub>se, med</sub> [W/m <sup>2</sup> /K]	Flusso term. [W]
Nord		0%				
Nord/Est	116	0%	90°	0.5	0.91	103
Est		0%				
Sud/Est	63	0%	90°	0.5	0.88	55
Sud		0%				
Sud/Ovest	116	0%	90°	0.5	0.87	99
Ovest		0%				
Nord/Ovest	63	0%	90°	0.5	0.75	46
Orizzontale		0%				
<b>TOTALE</b>	<b>359</b>					<b>303</b>

Fig. 3.7.4. Screen-shot della sezione del foglio "CALCOLO" riguardante il calcolo dei coefficienti di scambio termico risultanti e dell'extra-flusso infrarosso verso la volta celeste.

4.2 Scambio termico per trasmissione

Questa sezione è dedicata alla determinazione dell'energia scambiata per trasmissione sulla base dei coefficienti di scambio termico appena calcolati.

Al punto 4.2.1 viene presa in considerazione la trasmissione nella stagione di climatizzazione invernale ed il calcolo si differenzia per i due metodi: quello normativo e quello alternativo. Il primo è frutto di una semplice moltiplicazione dei coefficienti di scambio termico per le ore mensili e la differenza di temperatura interno-esterno mensile. Il secondo è più complesso perché devono essere calcolati separatamente gli scambi nei vari periodi di funzionamento nonché l'energia di restart.

Al punto 4.2.2 viene invece presa in considerazione la trasmissione nella stagione di climatizzazione estiva. Anche in questo caso il calcolo si differenzia per i due metodi: quello normativo e quello alternativo. Per i due metodi valgono le stesse considerazioni già fatte.

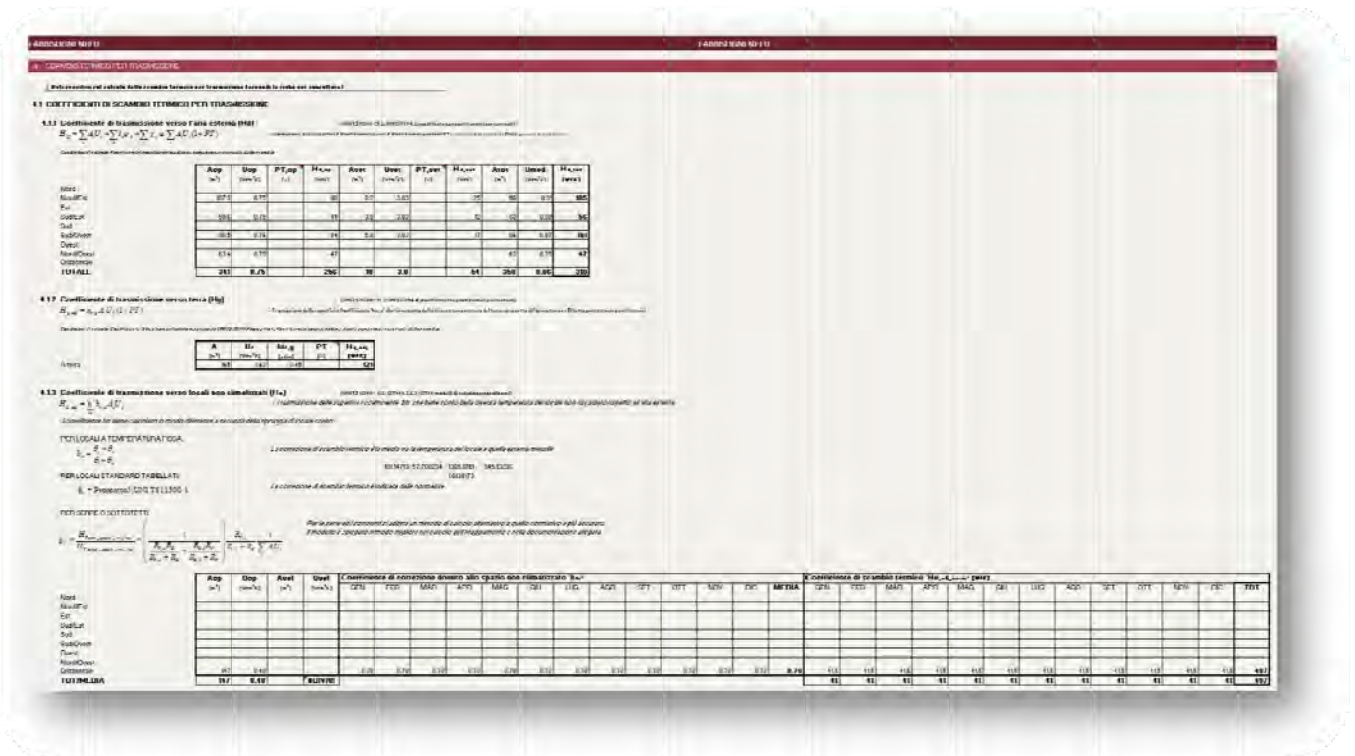


Fig. 3.7.5. Screen-shot della sezione del foglio “CALCOLO” riguardante il calcolo dello scambio termico per trasmissione per i diversi componenti edilizi.



## **5. Sotto-sezione SCAMBIO TERMICO PER VENTILAZIONE**

La seconda sotto-sezione della macro-sezione “FABBISOGNI NETTI” riguarda il calcolo dello scambio termico per ventilazione secondo le due metodologie: normativa e alternativa descritte ai paragrafi 2.6 e 2.7.

### 5.1 Coefficienti di scambio termico per ventilazione

Il punto 5.1 è dedicato al calcolo dei coefficienti di scambio termico relativi ai flussi di calore che transitano per ventilazione dallo spazio interno verso gli altri spazi.

Il primo calcolo (5.1.1) riguarda il coefficiente di ventilazione verso l'esterno. Vengono quindi calcolati in tabella i valori dei diversi coefficienti di scambio termico riferiti ai diversi livelli di ventilazione inseriti dall'utente.

Il secondo calcolo (5.1.2) riguarda il coefficiente di ventilazione verso spazi non climatizzati. Il procedimento è del tutto simile a quanto già detto per la trasmissione in quanto il concetto fondamentale riguarda sempre la determinazione della temperatura dello spazio non climatizzato e quindi del fattore di correzione.

Il risultato finale è riportato al punto (5.1.3) dove vengono calcolati i coefficienti di scambio termico nei tre diversi set-point: Livello 1, Livello 2 e Free-cooling.

5 SCAMBI TERMICI PER VENTILAZIONE

Metaparametri calcolati dallo scambio termico per ventilazione (prezida la riga per carattere)

### 5.1 COEFFICIENTI DI SCAMBIO TERMICO PER VENTILAZIONE

(UNITS 10/04-15.2; UN 13799 f; +modellazione alternativa 2 (forca erari))

**5.1.1 Coefficiente di ventilazione con aria esterna**

$$H_{H_{1,2,3,4,5,6}} = \rho_a \cdot C_{p,a} \cdot Q_{V,1,2,3,4,5,6}$$

Coefficiente invernale di scambio termico per ventilazione durante le ore di funzionamento (set-point 1) = Densità aria x Calore specifico x Portata di ventilazione con aria esterna

$$H_{H_{1,2,3,4,5,6}} = \rho_a \cdot b_{v,1,2,3,4,5,6} \cdot H_{H_{1,2,3,4,5,6}}$$

Coefficiente invernale di scambio termico per ventilazione durante le ore di non funzionamento (set-point 2)

$$H_{C_{1,2,3,4,5,6}} = \rho_a \cdot C_{p,a} \cdot Q_{C,1,2,3,4,5,6}$$

Coefficiente estivo di scambio termico per ventilazione durante le ore di funzionamento (set-point 1) = Densità aria x Calore specifico x Portata di ventilazione con aria esterna

$$H_{C_{1,2,3,4,5,6}} = \rho_a \cdot b_{v,1,2,3,4,5,6} \cdot C_{1,2,3,4,5,6}$$

Coefficiente estivo di scambio termico per ventilazione dovuto al free-cooling

Le ore interessate sono quelle di non attività (tipicamente le notturne) nei giorni di funzionamento estivi

Fattore di correzione (bve,c)

0%	Fattore che tiene in considerazione la ventilazione con temperatura diversa da quella esterna. Nel caso di ventilazione estiva coprimo l'efficienza di recupero di calore (se applicabile)											
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

**Coefficienti di scambio termico per ventilazione con aria esterna (wkw)**

GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT	
86	86	86	105	105	105	105	105	105	105	105	132	86	1771
86	86	86	105	105	105	105	105	105	105	105	132	86	1771
0	0	0	105	105	105	105	105	105	105	105	0	0	1481

**5.1.2 Coefficiente di ventilazione da spazi non climatizzati**

(UNITS 10/04-15.2; UN 13799 f; +modellazione alternativa 2 (forca erari))

$$H_{H_{1,2,3,4,5,6}} = \rho_a \cdot C_{p,a} \cdot Q_{V,1,2,3,4,5,6}$$

Coefficiente di scambio termico per ventilazione durante le ore di funzionamento (set-point 1)

= Densità aria x Calore specifico x Fattore di correzione della temperatura x Portata di ventilazione con aria da zona non climatizzata

$$H_{C_{1,2,3,4,5,6}} = \rho_a \cdot C_{p,a} \cdot Q_{C,1,2,3,4,5,6}$$

Coefficiente di scambio termico per ventilazione durante le ore di non funzionamento (set-point 2)

Il coefficiente bve,c viene calcolato in modo differente a seconda della tipologia di locale scelto

**FER LOCALI A TEMPERATURA FISSA:**

$$b_{v,c} = \frac{T_i - T_e}{T_i - T_n}$$

Lo scambiatore di scambio termico è lo scambiatore la temperatura del locale e quello esterno mensili

**FER LOCALI STANDARD TABELLATE:**

$b_{v,c}$  = Prospetto f, UNITS 11300-1

La correzione di scambio termico è indicata dalle normative

**FER SERRE O SOTTOTETTI:**

$$b_{v,c} = \frac{H_{v,serre} + H_{v,sottotetti}}{H_{v,serre} + H_{v,sottotetti} + H_{v,serre} + H_{v,sottotetti}} = \left( \frac{1}{\frac{R_{v,1}}{R_{v,1}} + \frac{R_{v,2}}{R_{v,2}}} \right) \cdot \frac{1}{R_{v,1} + R_{v,2}}$$

Per le serre ed i sottotetti si adotta un metodo di calcolo alternativo a quello normativo e più accurato. Il modello è spiegato in modo migliore nel capitolo dell'aggiornamento e nella documentazione allegata.

**NOTA BENE:** Il Fattore bve,c è il calcolatore sulla base dei valori di portata di ventilazione diurni. Lo stesso bve,c viene poi esteso anche alla portata notturna senza ricalcolare nuovamente il bilancio termico. Ciò comporta un errore che nella maggior parte dei casi è conservativo.

Fattore di correzione (bve,u)

1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

**Coefficienti di scambio termico per ventilazione da spazi non climatizzati (wkw)**

GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 5.1.3 RISULTATO: Coefficiente di scambio termico per ventilazione

$$H_{H_{1,2,3,4,5,6}} = H_{H_{1,2,3,4,5,6}} + H_{H_{1,2,3,4,5,6}}$$

Coefficiente di scambio termico per ventilazione durante le ore di funzionamento (set-point 1) = Scambio verso l'esterno + Scambio verso i locali non climatizzati

$$H_{H_{1,2,3,4,5,6}} = H_{H_{1,2,3,4,5,6}} + H_{H_{1,2,3,4,5,6}}$$

Coefficiente di scambio termico per ventilazione durante le ore di non funzionamento (set-point 2) = Scambio verso l'esterno + Scambio verso locali non climatizzati

$$H_{C_{1,2,3,4,5,6}} = H_{C_{1,2,3,4,5,6}}$$

Coefficiente di scambio termico per ventilazione dovuto al free-cooling estivo, possibile solo con l'aria esterna

Le ore interessate sono quelle di non attività (tipicamente le notturne) nei giorni di funzionamento estivi

**Coefficienti di scambio termico complessivo per ventilazione (wkw)**

GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT	
86	86	86	105	105	105	105	105	105	105	105	132	86	1771
86	86	86	105	105	105	105	105	105	105	105	132	86	1771
0	0	0	105	105	105	105	105	105	105	105	0	0	1481

Fig. 3.7.6. Screen-shot della sezione del foglio "CALCOLO" riguardante il calcolo dei coefficienti di scambio termico per ventilazione.

## 5.2 Scambio termico per ventilazione

Sulla base dei coefficienti già calcolati si procede al calcolo dello scambio termico per ventilazione.

Al punto 5.2.1 viene presa in considerazione la ventilazione nella stagione di climatizzazione invernale ed il calcolo si differenzia per i due metodi: quello normativo e quello alternativo.

Il primo è frutto di una semplice moltiplicazione dei coefficienti di scambio termico per le ore mensili e la differenza di temperatura interno-esterno mensile. Il secondo è più complesso perché devono essere calcolati separatamente gli scambi nei vari periodi di funzionamento nonché l'energia di restart. Al punto 5.2.2 viene invece presa in considerazione la ventilazione nella stagione di climatizzazione estiva. Anche in questo caso il calcolo si differenzia per i due metodi: quello normativo e quello alternativo. Per i due metodi valgono le stesse considerazioni già fatte.

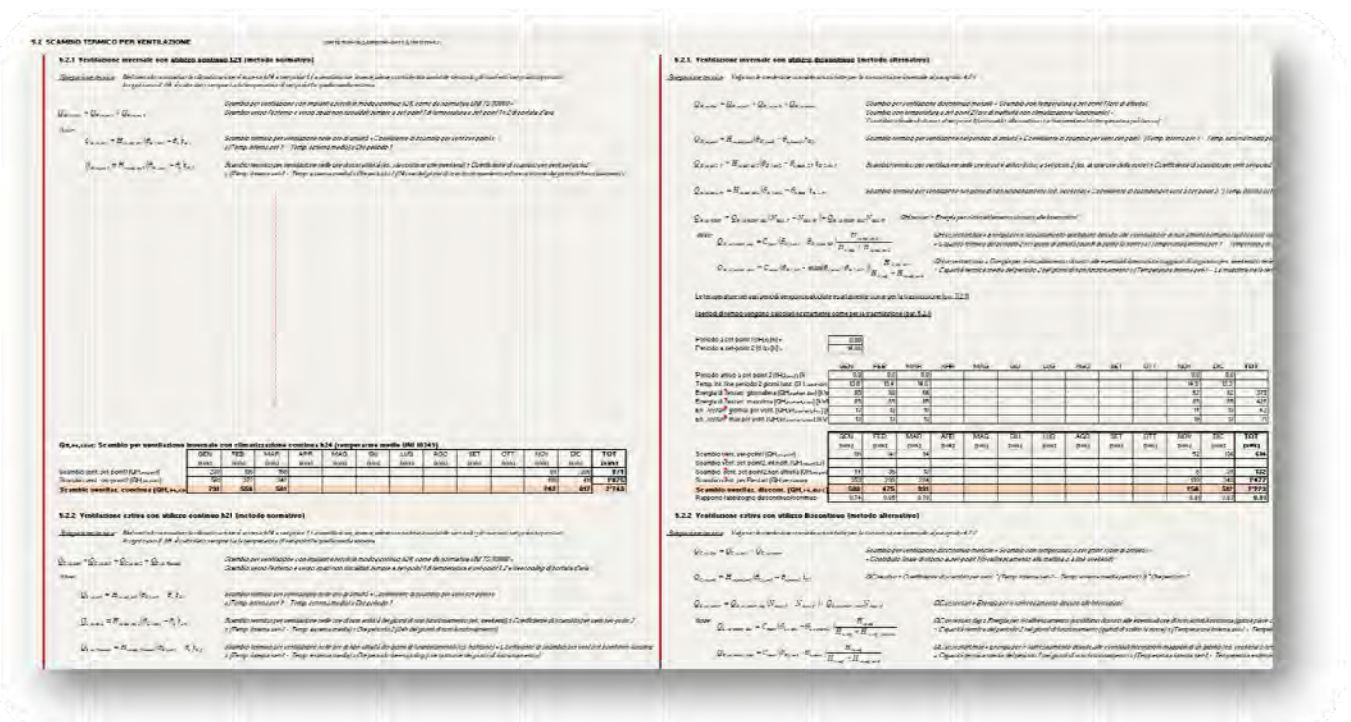


Fig. 3.7.7. Screen-shot della sezione del foglio "CALCOLO" riguardante il calcolo dello scambio termico per ventilazione secondo le due metodologie: a sinistra quella normativa e a destra quella alternativa.

## 6. Sotto-sezione APPORTI TERMICI INTERNI

La terza sotto-sezione della macro-sezione “FABBISOGNI NETTI” riguarda il calcolo degli apporti termici interni descritto al paragrafo 2.9.

Al punto 6.1.1 vengono valutati gli apporti sensibili nei vari periodi e livelli di utilizzo della struttura. Al punto 6.1.2 vengono valutati i latenti, sebbene non siano attualmente utilizzati nel calcolo.

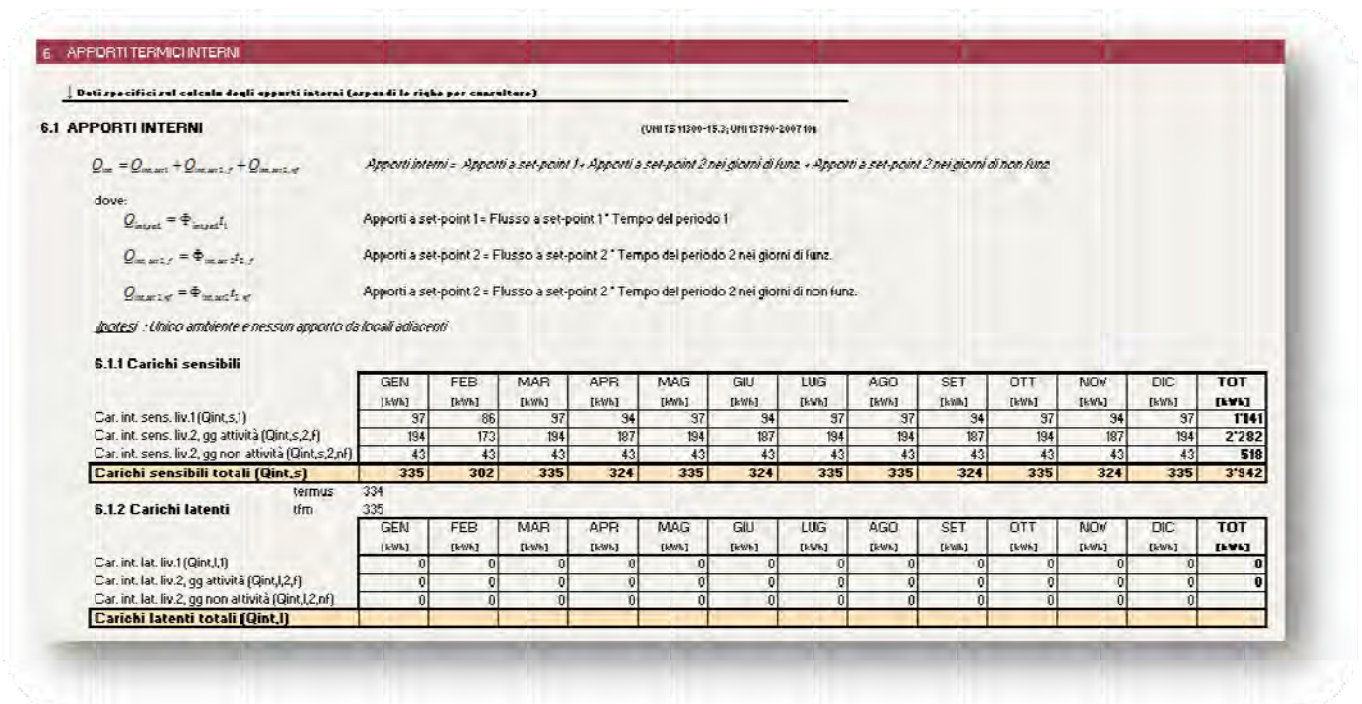


Fig. 3.7.8. Screen-shot della sezione del foglio “CALCOLO” riguardante il calcolo degli apporti interni nei vari periodi di utilizzo.

## 7. Sotto-sezione APPORTI TERMICI SOLARI

La quarta sotto-sezione della macro-sezione “FABBISOGNI NETTI” riguarda il calcolo degli apporti termici solari descritti al paragrafo 2.10.

Al punto 7.1.1 vengono calcolati gli apporti solari da componenti opachi sulla base dell’irraggiamento indicato dalla norma, dagli ombreggiamenti, dal fattore di assorbimento nonché dalle caratteristiche termiche delle pareti.

Al punto 7.1.2 vengono calcolati gli apporti da componenti vetriati. In questo caso l’apporto è influenzato anche dal fattore di telaio e dalla trasmittanza solare (onnidirezionale) della vetrata.

Al punto 7.1.2 vengono calcolati gli apporti da spazi non climatizzati. La trattazione completa può essere consultata al paragrafo 2.11.

Infine al punto 7.1.5 sono riportati i valori cumulati di tutti gli apporti solari.

**7. APPORTI TERMICI SOLARI**

**7.1 APPORTI SOLARI**

$Q_{sol} = \sum \Phi_{sol,trans} = Q_{sol,c} + Q_{sol,g} + Q_{sol,t}$

**7.1.1 Apporti solari componenti opachi (Qsol,c)**

$Q_{sol,c} = F_{sh,c} \cdot a_{sol,c} \cdot R_{tr} \cdot U_w \cdot A_w \cdot I_{sol,c}$

F. shading (Fsh,c)	a_sol,c	Apporto solare mensile entrante da componenti opachi (Qsol,c) [kWh]												
		GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT
Nord														
Nord/Est	0.60	38	56	100	146	203	222	236	188	124	78	43	33	1'468
Est														
Sud/Est	0.60	77	84	111	118	127	122	138	141	130	120	84	67	1'318
Sud														
Sud/Ovest	0.60	145	168	209	222	239	229	269	264	244	226	167	126	2'480
Ovest														
Nord/Ovest	0.60	22	33	59	86	119	131	139	110	73	46	26	20	863
Orizzontale														
<b>TOTALI / MEDIE</b>	<b>0.60</b>	<b>283</b>	<b>330</b>	<b>479</b>	<b>573</b>	<b>687</b>	<b>704</b>	<b>772</b>	<b>703</b>	<b>571</b>	<b>471</b>	<b>310</b>	<b>246</b>	<b>6'128</b>

**7.1.2 Apporti solari componenti vetri (Qsol,g)**

$Q_{sol,g} = F_{sh,g} \cdot (1 - F_{tr}) \cdot g \cdot A_w \cdot I_{sol,g}$

F. shading (Fsh,g)	F_tr	g	Apporto solare mensile entrante da componenti vetri (Qsol,g) [kWh]												
			GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT
Nord															
Nord/Est	0.16	0.77	105	152	274	402	556	609	647	515	340	214	119	91	4'025
Est															
Sud/Est	0.16	0.77	178	194	267	273	293	282	318	325	300	278	193	155	3'049
Sud															
Sud/Ovest	0.16	0.77	268	291	386	410	440	423	478	488	450	418	290	233	4'573
Ovest															
Nord/Ovest															
Orizzontale															
<b>TOTALI / MEDIE</b>	<b>0.13</b>	<b>2.30</b>	<b>551</b>	<b>637</b>	<b>916</b>	<b>1'085</b>	<b>1'289</b>	<b>1'313</b>	<b>1'444</b>	<b>1'328</b>	<b>1'090</b>	<b>910</b>	<b>602</b>	<b>479</b>	<b>11'646</b>

**7.1.3 Apporti solari da spazi non climatizzati (Qsol,t)**

PER LOCALI A TEMPERATURA FISSA E LOCALI STANDARD TABELLATI:

$Q_{sol,t} = 0$

**7.1.5 RISULTATO: Apporti solari totali (Qsol)**

	Apporto solare mensile totale (Qsol) [kWh]													
	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT	
Nord														
Nord/Est	143	208	373	548	759	831	884	703	464	292	163	124	5'492	
Est														
Sud/Est	256	278	368	392	420	403	456	466	430	399	277	222	4'366	
Sud														
Sud/Ovest	413	448	595	633	678	652	737	752	695	644	447	359	7'053	
Ovest														
Nord/Ovest	22	33	59	86	119	131	139	110	73	46	26	20	863	
Orizzontale														
<b>App. solare totale (Qsol)</b>	<b>834</b>	<b>967</b>	<b>1'395</b>	<b>1'658</b>	<b>1'977</b>	<b>2'017</b>	<b>2'216</b>	<b>2'031</b>	<b>1'661</b>	<b>1'381</b>	<b>912</b>	<b>725</b>	<b>17'775</b>	
<b>App. solare giorni di attività (Qsol,r)</b>	<b>727</b>	<b>829</b>	<b>1'215</b>	<b>1'437</b>	<b>1'722</b>	<b>1'748</b>	<b>1'930</b>	<b>1'769</b>	<b>1'440</b>	<b>1'203</b>	<b>791</b>	<b>631</b>	<b>15'437</b>	
<b>App. solare giorni di non attività (Qsol,t)</b>	<b>108</b>	<b>138</b>	<b>180</b>	<b>221</b>	<b>255</b>	<b>269</b>	<b>286</b>	<b>262</b>	<b>221</b>	<b>178</b>	<b>122</b>	<b>94</b>	<b>2'337</b>	
termus		983												
tfm		903												

Fig. 3.7.9. Screen-shot della sezione del foglio "CALCOLO" riguardante il calcolo degli apporti solari.

**8. Sotto-sezione FABBISOGNO NETTO PER CLIMATIZZAZIONE**

La quinta sotto-sezione della macro-sezione “FABBISOGNI NETTI” riguarda il calcolo del fabbisogno di energia utile per climatizzazione (invernale ed estiva) secondo le due metodologie: normativa e alternativa descritte ai paragrafi 2.1 e 2.2.

**8.1 Energia netta di riscaldamento**

Questa sezione è dedicata alla climatizzazione nella stagione invernale ed è finalizzata al calcolo del fabbisogno energetico utile dovuto esclusivamente all’involucro, cioè al netto degli impianti.

Al punto 8.1.1 viene preso in considerazione il fabbisogno netto nella stagione di climatizzazione invernale ed il calcolo si differenzia per i due metodi: quello normativo e quello alternativo. In entrambi i calcoli vengono sommati algebricamente le dispersioni e gli apporti gratuiti, questi ultimi detratti del fattore di utilizzazione. Nel calcolo alternativo, però, i bilanci sono due poiché i periodi di funzionamento e quelli di non funzionamento sono di fatto separati ed indipendenti tra loro. Inoltre all’interno dei singoli calcoli vanno tenute in considerazione le componenti sia di livello 1 che di livello 2 che di restart.

I risultati rappresentano l’energia utile che il sistema di riscaldamento deve fornire durante la stagione invernale al netto delle perdite.

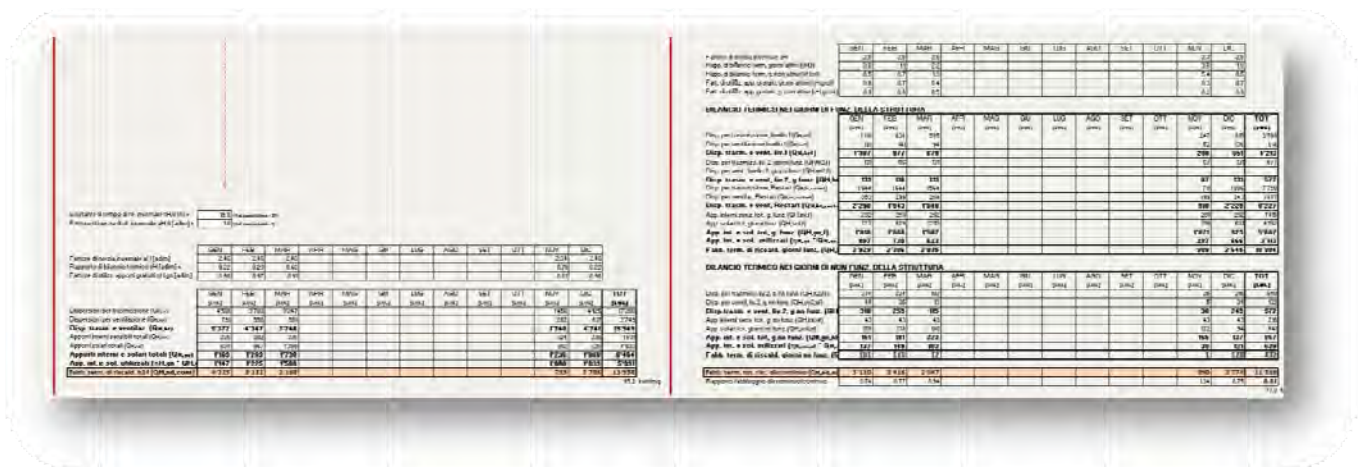


Fig. 3.7.10. Screen-shot della sezione del foglio “CALCOLO” riguardante il calcolo del fabbisogno energetico netto per riscaldamento secondo le due metodologie: a sinistra quella normativa e a destra quella alternativa.

8.2 Energia netta di raffreddamento

Questa sezione è dedicata alla climatizzazione nella stagione estiva ed è finalizzata al calcolo del fabbisogno energetico utile dovuto esclusivamente all’involucro, cioè al netto degli impianti.

Al punto 8.2.1 viene preso in considerazione il fabbisogno netto nella stagione di climatizzazione estiva ed il calcolo si differenzia per i due metodi: quello normativo e quello alternativo. In entrambi i calcoli vengono sommati algebricamente apporti e dispersioni, queste ultime detratte del fattore di utilizzazione. Nel calcolo alternativo, però, i bilanci sono due poiché i periodi di funzionamento e quelli di non funzionamento sono di fatto separati ed indipendenti tra loro. Inoltre all’interno dei singoli calcoli vanno tenute in considerazione le componenti sia di livello 1 che di livello 2 che di restart.

I risultati rappresentano l’energia utile che il sistema di raffreddamento deve fornire durante la stagione estiva al netto delle perdite.

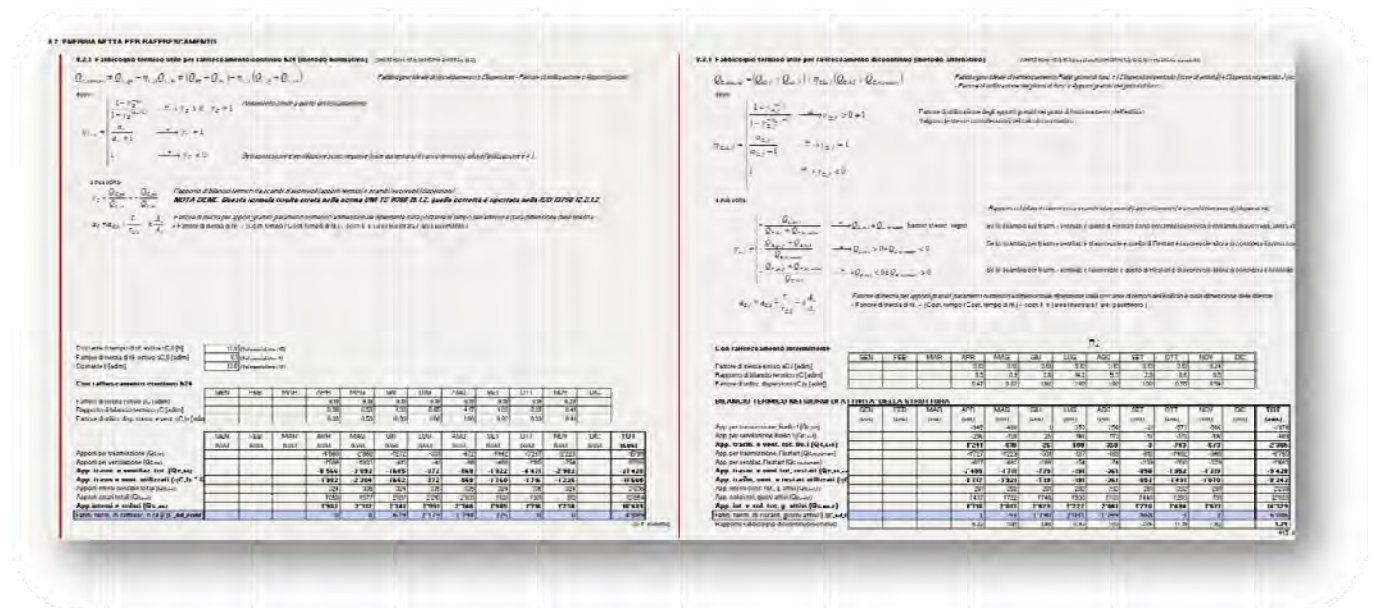


Fig. 3.7.11. Screen-shot della sezione del foglio “CALCOLO” riguardante il calcolo del fabbisogno energetico netto per raffreddamento secondo le due metodologie: a sinistra quella normativa e a destra quella alternativa.

### 9. Sotto-sezione FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE PER ACQUA CALDA SANITARIA

La sesta sotto-sezione della macro-sezione “FABBISOGNI NETTI” riguarda il calcolo del fabbisogno energetico per la produzione di acqua calda sanitaria descritto al paragrafo 2.12.

Sono riportati i valori delle temperature dell’acqua editabili dall’utente. Sono inoltre riportati i dati della norma sull’utilizzo di acqua calda sanitaria a seconda della destinazione d’uso scelta dall’utente e dal parametro  $N_u$ . Sono infine calcolati i volumi d’acqua richiesti e il corrispondente fabbisogno energetico.

8. FABBISOGNO di ENERGIA NETTA per ACQUA CALDA SANITARIA (UNITS 10<sup>4</sup> kWh/25.2)

FORMULA

Temperatura dell'acqua (realtà) [°C] = 15.0 (Val. consigliato 15°C)  
 Temperatura di erogazione [°C] = 40.0 (Val. consigliato 40°C)

Fabbisogno giornaliero specifico (s) = 14 l/Gmq (Attività: Residenziale)  
 Parametro a unità di misura del consumo (Nu) = 10  
 Volume d'acqua richiesto giornalmente (Vu) = 14 l/G - 0.01 mc/G

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT
Volume d'acqua richiesto con utilizzo continuo (Vv.mens.cont) [mc]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	5
Volume d'acqua richiesto con utilizzo discontinuo (Vv.mens.disc) [mc]	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	4
<b>Fabbisogno termico per ACS con utilizzo continuo (Qh.v)</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>148</b>
<b>Fabbisogno termico per ACS con utilizzo discontinuo (Qh.d)</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>128</b>

Fig. 3.7.12. *Screen-shot* della sezione del foglio “CALCOLO” riguardante il calcolo del fabbisogno energetico netto per la produzione di acqua calda sanitaria.

### 10. Sotto-sezione FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA

La settima sotto-sezione della macro-sezione “FABBISOGNI NETTI” riguarda il calcolo del fabbisogno energetico dovuto agli utilizzi elettrici aggiuntivi rispetto a quanto eventualmente verrà assorbito per la climatizzazione e la produzione di acqua calda sanitaria.



### 3.7.5 **Sezione “BILANCI ENERGETICI” del foglio “CALCOLO”**

In questa sezione sono racchiusi i bilanci energetici del sistema “edificio” con i sistemi “impianti”. Viene dunque determinata la modalità con la quale gli impianti soddisfano i fabbisogni energetici netti calcolati nella precedente sezione. I bilanci da eseguire riguardano i tre utilizzi energetici valutati dal software e sono riportati nelle tre seguenti sotto-sezioni:

11. Bilancio climatizzazione
12. Bilancio acqua calda sanitaria
13. Bilancio energia elettrica

Si analizzano di seguito le singole sotto-sezioni.

#### **1. Sotto-sezione BILANCIO CLIMATIZZAZIONE**

In questa sotto-sezione vengono riportati i fabbisogni energetici netti invernali ed estivi nonché i vari sistemi impiantistici in grado di soddisfarli. Essi sono disposti in ordine di priorità ed il software Archi-Energy provvede a soddisfare automaticamente il fabbisogno attingendo all’energia producibile dai vari impianti secondo il suddetto ordine. In base a ciò il software calcola la percentuale di utilizzo di ogni singolo impianto (utile per verificare il corretto dimensionamento), l’eventuale consumo di combustibile nonché tutti gli aspetti economici di spese e ricavi legati all’acquisto delle materie prime, alla vendita di energia e all’incentivazione.

BILANCI ENERGETICI												
CLIMATIZZAZIONI												
Quota (zoni)	100%	100%	100%	100%	50%	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%
	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
Investimento	124.5	111.9	88.4	42.1	22.2	0.0	0.0	0.0	20.6	41.2	80.9	40.2
Pull-down piscina	18.8	12.9	11.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	10.2	13.5
Imbriaco	71.1	61.1	1.1	10.0	-20.7	-17.8	-17.5	-12.9	-75.5	10.0	1.0	11.7
Salto salito	5.2	4.1	0.6	0.0	-14.8	-22.1	-25.1	-21.2	-17.7	0.0	2.3	6.4
Spogliatoi polistrada	5.9	6.2	5.9	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	5.1	6.7
<b>Fabbisogno netto di RISCALDAMENTO</b>	<b>173.5</b>	<b>147.4</b>	<b>108.9</b>	<b>57.7</b>	<b>77.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>70.6</b>	<b>49.0</b>	<b>104.9</b>	<b>51.3</b>
<b>Fabbisogno netto di RAFFRESCAMENTO</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
<b>Fabbisogno netto di RAFFRESCAMENTO</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
Quota percentuale dei fabbisogni	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Coegen: energia consumata (gpc)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coegen: energia consumata (primaria MWh)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coegen: energia consumata (primaria TEP)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coegen: emissioni CO2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coegen: combustibile consumato (gas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coegen: spesa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Pompa: energia consumata (gpc)</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>
Pompa: energia consumata (primaria MWh)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pompa: energia consumata (primaria TEP)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pompa: emissioni CO2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pompa: spesa	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>Caldaia 1: energia fornita</b>	<b>172.5</b>	<b>147.3</b>	<b>108.9</b>	<b>57.7</b>	<b>77.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>70.6</b>	<b>49.0</b>	<b>104.9</b>	<b>51.3</b>
Caldaia 1: energia consumata (primaria MWh)	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6
Caldaia 1: energia consumata (primaria TEP)	201.7	173.8	127.4	61.6	35.9	-	-	-	24.0	57.3	122.0	59.8
Caldaia 1: emissioni CO2	240	205	152	73	31	-	-	-	29	68	145	118
Caldaia 1: combustibile consumato	34	31	15	7	3	-	-	-	5	15	31	19
Caldaia 1: spesa	52	44	33	16	7	-	-	-	9	15	31	25
<b>Caldaia 2: energia fornita</b>	<b>19.281</b>	<b>16.476</b>	<b>12.185</b>	<b>5.893</b>	<b>7.481</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.389</b>	<b>5.482</b>	<b>11.665</b>	<b>5.416</b>
Caldaia 2: energia consumata (primaria MWh)	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6
Caldaia 2: energia consumata (primaria TEP)	201.7	173.8	127.4	61.6	35.9	-	-	-	24.0	57.3	122.0	59.8
Caldaia 2: emissioni CO2	240	205	152	73	31	-	-	-	29	68	145	118
Caldaia 2: combustibile consumato	34	31	15	7	3	-	-	-	5	15	31	19
Caldaia 2: spesa	52	44	33	16	7	-	-	-	9	15	31	25
<b>Soddisf. fabb. di RISC/RAFFRESCAMENTO</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>
<b>SPESA TOTALE [€]</b>	<b>236</b>	<b>198</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>
<b>SPESA TOTALE [€]</b>	<b>236</b>	<b>198</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>	<b>138</b>

Fig. 3.7.13. Screen-shot della sezione del foglio "CALCOLO" riguardante i bilancio termico complessivo per il soddisfacimento del fabbisogno energetico di climatizzazione invernale ed estiva mediante l'utilizzo degli impianti disponibili. Calcolo di esempio (centro sportivo).

## 2. Sotto-sezione BILANCIO ACQUA CALDA SANITARIA

In questa sotto-sezione vengono riportati i fabbisogni energetici netti di energia per acqua calda sanitaria nonché i vari sistemi impiantistici in grado di soddisfarli. Il calcolo è del tutto simile a quanto detto al punto 11, perciò si rimanda ad esso per ulteriori spiegazioni.

## 3. Sotto-sezione BILANCIO ENERGIA ELETTRICA

In questa sotto-sezione vengono riportati i fabbisogni energetici netti di energia elettrica nonché i vari sistemi impiantistici in grado di soddisfarli. Il calcolo è del tutto simile a quanto detto al punto 11, perciò si rimanda ad esso per ulteriori spiegazioni. Le uniche differenze riguardano il fatto che l'energia può essere facilmente prelevata dalla rete o immessa in rete. Ciò conduce a bilanci con caratteristiche leggermente diverse.

### 3.7.6 Sezione “RISULTATI” del foglio “CALCOLO”

In quest’ultima sezione vengono riportati i risultati finali dell’analisi svolta. Essi sono raggruppati in 6 prospetti che descrivono la situazione sotto diversi punti di vista.

#### PROSPETTO CONSUMI

Il primo prospetto è un resoconto sui consumi energetici suddivisi per centro di consumo e per vettore energetico. Qui è possibile avere una visione globale dell’apporto energetico necessario al funzionamento della struttura nonché della sua distribuzione nelle diverse fonti rinnovabili e non rinnovabili.

DIAGNOSI ENERGETICA "CENTRO SPORTIVO FITNESS Srl" - BASELINE												
DESCRIZIONE DELLA CONDIZIONE DI CALCOLO												
Sistema tradizionale composto da: riscaldamento e produzione di ACS da caldaia a camera stagna a gas naturale; raffrescamento da gruppo frigorifero. Nessun impianto di produzione elettrica.												
PROSPETTO CONSUMI												
Prospetto dei consumi di energia e di combustibili per i diversi impieghi e confronto con la situazione di riferimento ("baseline")												
	Energia elettrica		Energia da combustione						Acqua			
	[MWh]	Confr. con riferimento	[MWh]	Confr. con riferimento	Gas naturale [Smc]	Confronto	Biomassa [kg]	Confronto	[...]	Confronto	[mc]	Confr. con riferimento
Climatizzazione	309		891		94'092							
Acqua calda e piscine	-		1'122		119'209						25'002	
Illuminazione	138											
UtENZE	131											1'600
perdite	79											
Autoproduzione	-											
<b>TOTALE CONSUMI DA PAGARE</b>	<b>677</b>		<b>2'013</b>		<b>213'961</b>						<b>26'602</b>	
Energia reattiva												
			223	MVarh								

Fig. 3.7.14. Prospetto consumi per un calcolo di esempio (centro sportivo).

#### PROSPETTO IMPIANTI

Il secondo prospetto è dedicato agli impianti e mette in luce i dati di utilizzo degli stessi. In particolare vengono riportati, per ogni sistema impiantistico installato, la percentuale di sfruttamento medio della potenza nominale, la produzione elettrica, la produzione termica nonché la percentuale di copertura dei fabbisogni energetici suddivisa per i diversi utilizzi. Questa tabella risulta molto utile per verificare il corretto dimensionamento dei sistemi impiantistici.



PROSPETTO FLUSSI ECONOMICI				Prospetto dei flussi economici generati dall'esercizio degli impianti	
	Annuali	Mensili	confr. con stato attuale		
Spesa di acquisto energia elettrica	€ 115'811	€ 11'284	0,0%		
Piastrelle per energia reattiva	€ -	€ -			
Spesa di acquisto gas metano	€ 1'98'528	€ 16'544			
Spesa di acquisto acqua	€ 11'791	€ 2'615			
Spese di manutenzione	€ 6'000	€ 500			
Ricavo da cessione dell'energia prodotta	€ -	€ -			
Ricavo da incentivi fotovoltaico	€ -	€ -			
Risparmio da detrazioni fiscali	€ -	€ -			
Ricavo da certificati bianchi	€ -	€ -			
<b>TOTALE</b>	<b>€ 371'330</b>	<b>€ 30'944</b>			

<b>CERTIFICATI BIANCHI:</b>	
Risparmio per l'investimento (RNI)z	0 TEP
Risparmio minimo per l'investimento -	60 TEP

Fig. 3.7.17. Prospetto flussi economici per un calcolo di esempio (centro sportivo).

### PROSPETTO INVESTIMENTI

Il penultimo prospetto riguarda invece gli investimenti iniziali da affrontare per l'intervento descritto. Il valore degli investimenti è calcolato come la somma dei costi, indicati sul foglio TECNOLOGIE, dei vari elementi inseriti nel progetto. Sta quindi all'utente definire quali dei componenti del sistema edificio/impianto debbano essere considerati nella voce "investimenti".

PROSPETTO INVESTIMENTI		Prospetto degli Investimenti Iniziali per l'acquisto degli impianti o per la realizzazione di interventi	
	Importo/Importo		
	€ -		
Caldaia a gas a camera stagna	€ 120'000		
Gruppo frigo	€ 1.000'000		
	€ -		
Caldaia a gas a camera stagna per ACS	€ 60'000		
	€ -		
	€ -		
	€ -		
	€ -		
	€ -		
	€ -		
<b>TOTALE</b>	<b>€ 300'000</b>		

Fig. 3.7.18. Prospetto investimenti per un calcolo di esempio (centro sportivo).

### PROSPETTO ANALISI ECONOMICO/FINANZIARIA

L'ultimo prospetto riguarda l'analisi dei flussi di cassa negli anni e quindi il calcolo degli indicatori di profittabilità economico/finanziaria dell'investimento. Mediante tale prospetto è possibile studiare accuratamente l'andamento economico negli anni e determinare la convenienza economica dell'investimento.

### **3.8 Modellazione della zona di calcolo nelle configurazioni alternative**

Archi-Energy permette facilmente di effettuare confronti su varie soluzioni progettuali diverse. Una volta modellata la zona di calcolo nella configurazione “baseline”, così come descritto nel paragrafo 3.7, è molto semplice creare configurazioni alternative e confrontarle alla prima. Per farlo è sufficiente aprire il foglio “Calcolo (Sol.1)” e premere il pulsante “Copia da baseline”. In questo modo il software copierà automaticamente tutti i contenuti del foglio di calcolo base in quello attivo. Così facendo la “Soluzione 1” sarà identica alla “Soluzione baseline” e si potrà procedere alla modifica di qualsiasi parametro nel foglio stesso. Il software eseguirà un calcolo indipendente per ogni soluzione descritta e nei prospetti dei risultati finali sono già predisposte colonne di confronto dalle quali è possibile individuare con facilità le variazioni.

E’ possibile inserire infinite soluzioni diverse semplicemente duplicando il foglio “Calcolo (Sol.1)” tante volte quante soluzioni si desidera creare. Con il pulsante “Copia da baseline” è sempre possibile *resettare* tutti i valori per inserire una nuova configurazione.

DIAGNOSI ENERGETICA "CENTRO SPORTIVO FITNESS Srl" - SOLUZIONE 1														
DESCRIZIONE DELLA CONDIZIONE DI CALCOLO														
Pompa di calore aria/aria da 550kW a recupero + Cogeneratore endotermico a gas da 60kW + Caldaia a biomassa per acqua calda da 80kW + Fotovoltaico da 130kW														
PROSPETTO CONSUMI <span style="float: right;">Prospetto dei consumi di energia e di combustibili per i diversi impieghi e confronto con la situazione di riferimento ("baseline")</span>														
	Energia elettrica		Energia da combustione					Acqua						
	[MWh]	Confr. con riferimento	[MWh]	Confr. con riferimento	Gas naturale [Smc]	Biomassa [kg]	Confronto	[...]	Confronto	[mc]	Confr. con riferimento			
Climatizzazione	609	64.9%	95	-89.3%	10'092	-	0.0%	-	0.0%	-	-			
Acqua calda e piscine	-	0.0%	1'255	11.8%	115'416	-3.2%	56'147	0.0%	0.0%	25'002	0.0%			
Illuminazione	118	0.0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
UtENZE	151	0.0%	-	-	-	-	-	-	-	1'600	0.0%			
Perdite	42	8.8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Autoproduzione elettrica	373	0.0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
<b>TOTALE CONSUMI DA PAGARE</b>	<b>547</b>		<b>1'349</b>		<b>125'508</b>		<b>56'147</b>			<b>26'602</b>				
Energia reattiva	180	MVarh	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
PROSPETTO IMPIANTI <span style="float: right;">Prospetto del funzionamento degli impianti e analisi dei flussi energetici</span>														
	Regime di funz. max [%]	Energia elettrica				Energia termica				Copertura fabbisogni				
		Totale [MWh]	Utilizzata [%]	Ceduta [%]	Persa [%]	Copertura fabbisogni [%]	Totale [MWh]	Utilizzata [%]	Ceduta [%]	Persa [%]	Riscaldam. [%]	Raffrescam. [%]	ACS [%]	Altro [%]
...	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pompa di calore aria/aria con recupero	86%	-	-	-	-	-	1'093	100%	-	-	94%	100%	33%	-
Caldaia a biomassa	74%	-	-	-	-	-	121	100%	-	-	-	-	13%	-
...	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
...	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Impianto fotovoltaico da 130kW	100%	178	90%	10%	0%	18%	-	-	-	-	-	-	-	-
Cogeneratore endotermico a gas	100%	354	60%	40%	-	24%	531	100%	-	-	6%	-	-	54%
...	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rete elettrica	-	-	-	-	-	99%	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTALE</b>		<b>533</b>	<b>373</b>	<b>160</b>		<b>100%</b>	<b>1'746</b>				<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	
PROSPETTO INDICI AMBIENTALI E PRESTAZIONALI <span style="float: right;">Prospetto dei fabbisogni di energia primaria, delle emissioni di CO2 e degli indici per la classificazione energetica</span>														
	Energia primaria		Emissioni		Indici e classificazione energetica									
	[MWh]	[TEP]	[tCO2]		Indici EP		Classe energetica							
					[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]								
Climatizzazione invernale	952	168	509		388	87								
Climatizzazione estiva (solo involucre)	374				152	76								
Climatizzazione estiva (completa)	490	92	283		199	99								
Produzione di acqua calda sanitaria	354	36	76		144	32								
Riscaldamento acqua della piscina	939	96	202		1'565	313								
Illuminazione	257	48	149		105	24								
UtENZE	330	62	191		134	30								
...	-	-	-		-	-								
...	-	-	-		-	-								
<b>TOTALI E MEDIE</b>	<b>3'695</b>	<b>502</b>	<b>1'410</b>		<b>1'505</b>	<b>338</b>								
PROSPETTO FLUSSI ECONOMICI <span style="float: right;">Prospetto dei flussi economici generati dall'esercizio degli impianti</span>														
	Annuali	Mensili	Confr. con stato attuale											
Spesa di acquisto energia elettrica	-€ 109'440	-€ 9'120	-19.2%											
Penali per energia reattiva	€ -	€ -	0.0%											
Spesa di acquisto gas metano	-€ 119'232	-€ 9'936	-39.9%											
Spesa di acquisto acqua	-€ 31'391	-€ 2'616	0.0%											
Spese di manutenzione	-€ 7'925	-€ 660	32.1%											
Ricavo da cessione dell'energia prodotta	€ 15'954	€ 1'330	+++											
Ricavo da incentivi fotovoltaico	€ 35'641	€ 2'970	+++											
Risparmio da detrazioni fiscali	€ -	€ -	0.0%											
Ricavo da certificati bianchi	€ 121'120	€ 10'093	+++											
...	-	-	-											
...	-	-	-											
<b>TOTALE</b>	<b>-€ 95'272</b>	<b>-€ 7'939</b>												
<b>RISPARMIO (rispetto all'attuale)</b>	<b>€ 276'057</b>	<b>€ 23'005</b>												
				CERTIFICATI BIANCHI:										
				Risparmio per l'intervento (RNI)= 1'275 TEP solo scheda 26										
				Risparmio minimo per l'intervento = 40 TEP										
PROSPETTO INVESTIMENTI <span style="float: right;">Prospetto degli investimenti iniziali per l'acquisto degli impianti o per la realizzazione di interventi</span>														
	Investimento													
...	€ -													
...	€ -													
Pompa di calore aria/aria con recupero	€ 165'000													
Caldaia a biomassa	€ 12'000													
...	€ -													
...	€ -													
Impianto fotovoltaico da 130kW	€ 325'000													
Cogeneratore endotermico a gas	€ 96'000													
...	€ -													
...	€ -													
<b>TOTALE</b>	<b>€ 598'000</b>													
PROSPETTO ANALISI ECONOMICO/FINANZIARIA <span style="float: right;">Analisi di profittabilità degli investimenti</span>														
Tempo di ritorno semplice	2.2 anni													

Fig. 3.8.1. Prospetti risultanti da una scelta impiantistica alternativa (Soluzione 1) rispetto alla *baseline* riportata nelle figure dalla 3.7.14 alla 3.7.18. I confronti sono effettuati rispetto ad essa.

## **Capitolo 4**

### **Validazione del modello su piccola scala**



## 4.1 Obiettivo

Lo sviluppo di un software di calcolo energetico è una problematica complessa in cui è presente una pesante mole di calcoli e i cui *input* sono largamente soggetti a sottili differenze interpretative che però possono condurre ad errori finali sostanziali. E' dunque imprescindibile un processo di validazione che permetta di assicurare l'affidabilità del metodo di calcolo.

Per Archi-Energy, essendo un software per metà basato sui metodi di calcolo UNI TS 11300, si è deciso di seguire una modalità di valutazione in linea con quella definita dal Comitato Termotecnico Italiano per la certificazione dei software commerciali di calcolo energetico. In particolare si è proceduto con una metodologia di confronto tra Archi-Energy ed altri due software già certificati CTI: Termus della Acca Software e Stima10-TFM della Watts Industries. La base del confronto sono le tipologie edilizie raccomandate dal CTI nelle pubblicazioni "UNI TS 11300 - Studi di caso". Di queste si è seguita esattamente la geometria edilizia, mentre le caratteristiche termiche dei componenti edilizi e gli aspetti riguardanti gli impianti sono stati decisi arbitrariamente in quanto non è stato possibile venire in possesso delle relazioni di calcolo originali pubblicate dal CTI. Tuttavia ciò non inficia la validità del confronto in quanto le stesse assunzioni sono state fatte per tutti e tre i software e dunque i risultati devono essere in ogni caso identici.

L'obiettivo della validazione è di verificare che i risultati di Archi-Energy differiscano di un valore non superiore al  $\pm 5\%$  rispetto agli altri due software certificati.

Per semplicità di trattazione si riporterà un solo esempio di calcolo, riferito allo "Studio di caso Edificio 1E" in quanto gli altri hanno risultati del tutto analoghi.

## 4.2 Benchmark 1: Studio di caso CTI - Edificio 1E

Lo studio di caso 1E descrive una villetta unifamiliare su tre piani: seminterrato, piano terra e sottotetto non riscaldato. La superficie è di circa  $164 \text{ m}^2$  lordi a piano, pari a circa  $147 \text{ m}^2$  netti, quindi per un totale di circa  $293 \text{ m}^2$  netti e circa  $857 \text{ m}^3$  netti riscaldati, costituenti un'unica zona termica.

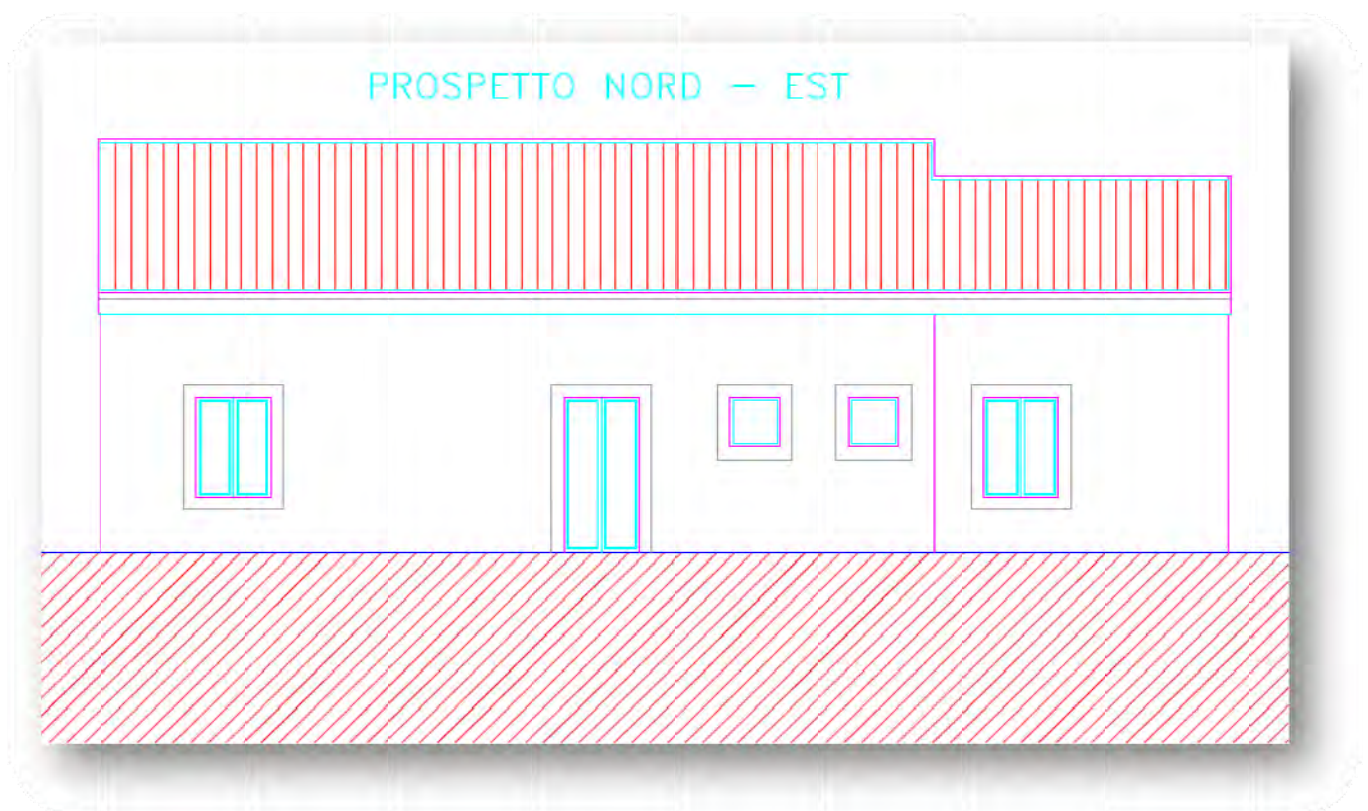


Fig. 4.2.1. Prospetto Nord-Est.

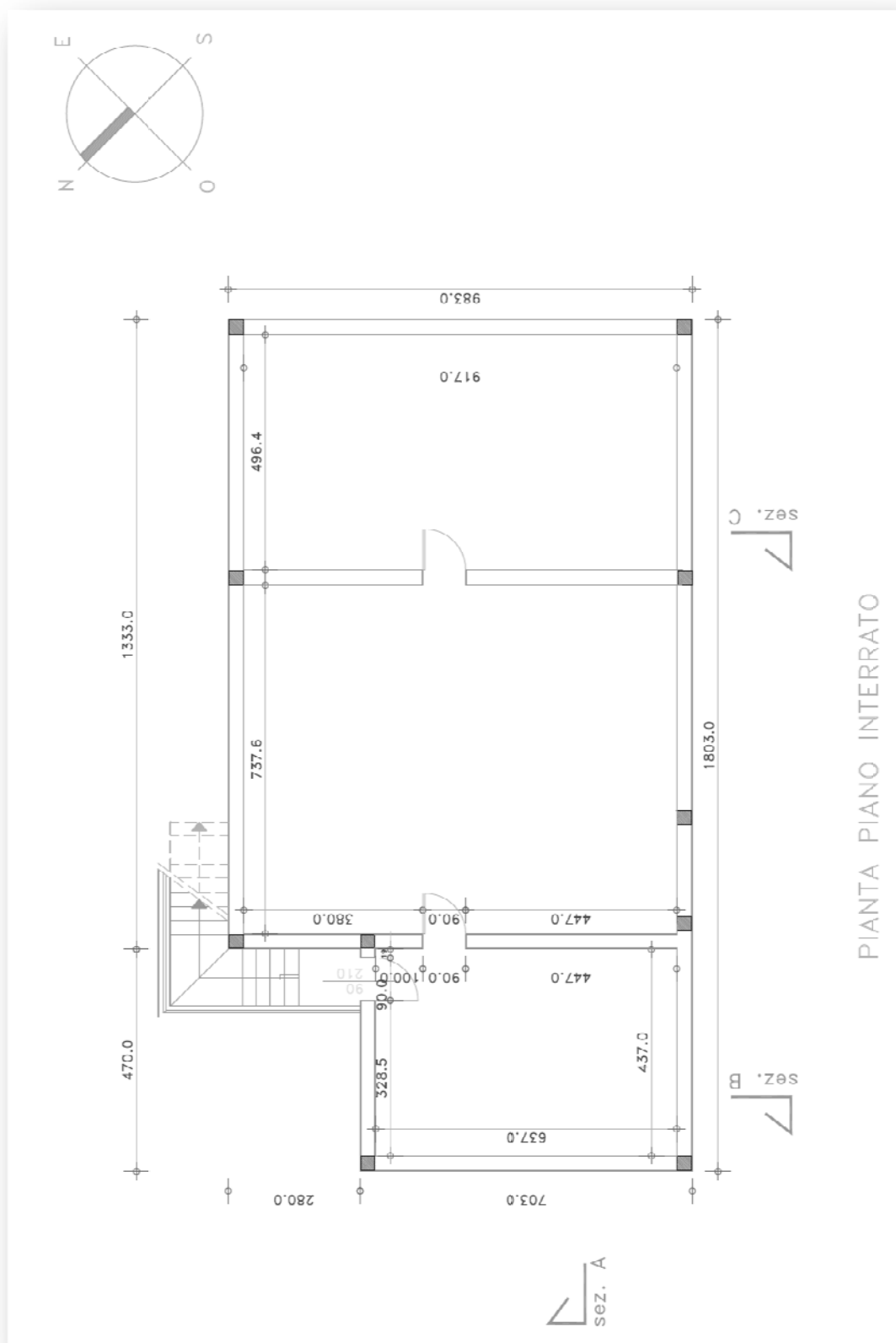


Fig. 4.2.2. Pianta del piano interrato.

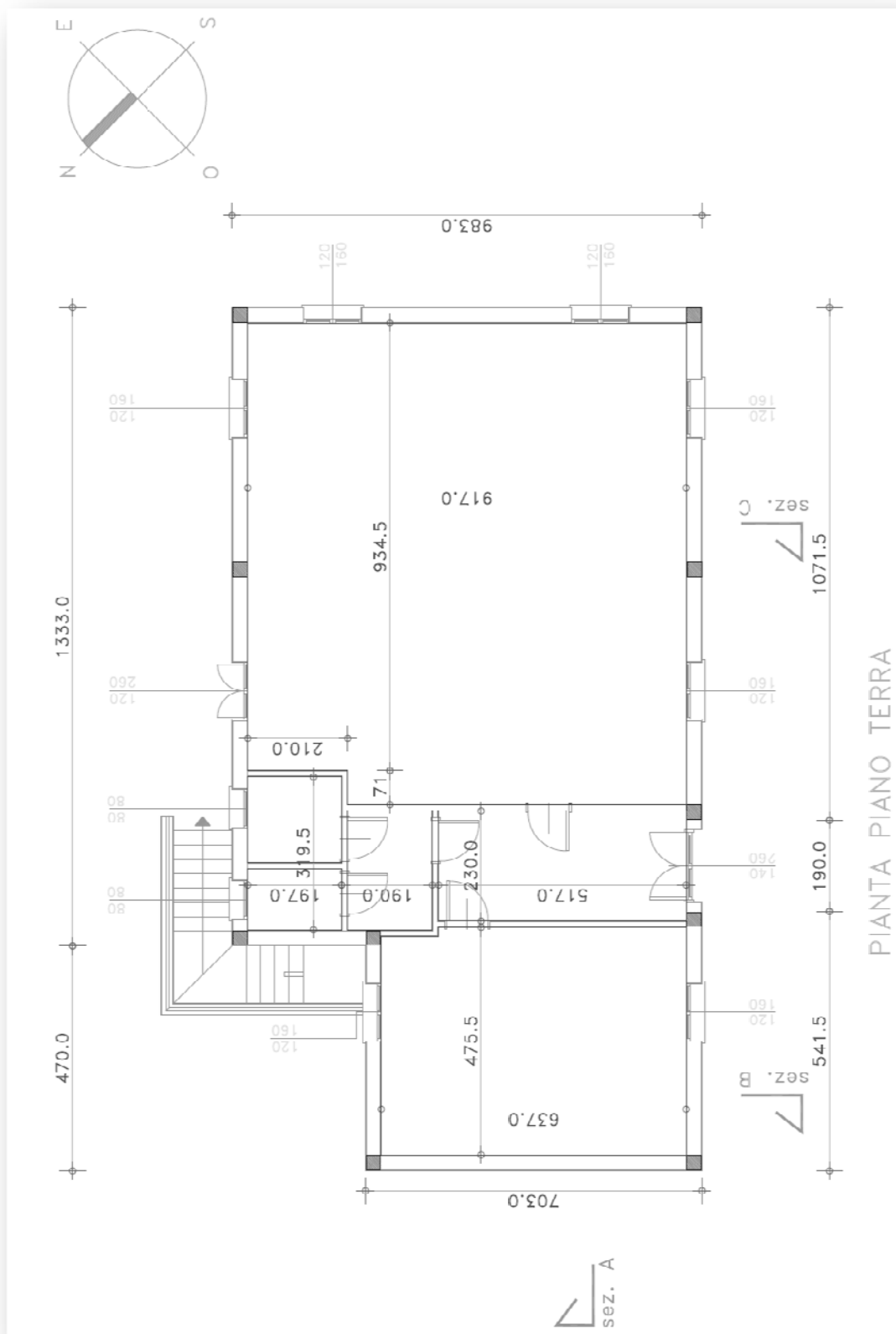


Fig. 4.2.3. Pianta del piano terra.

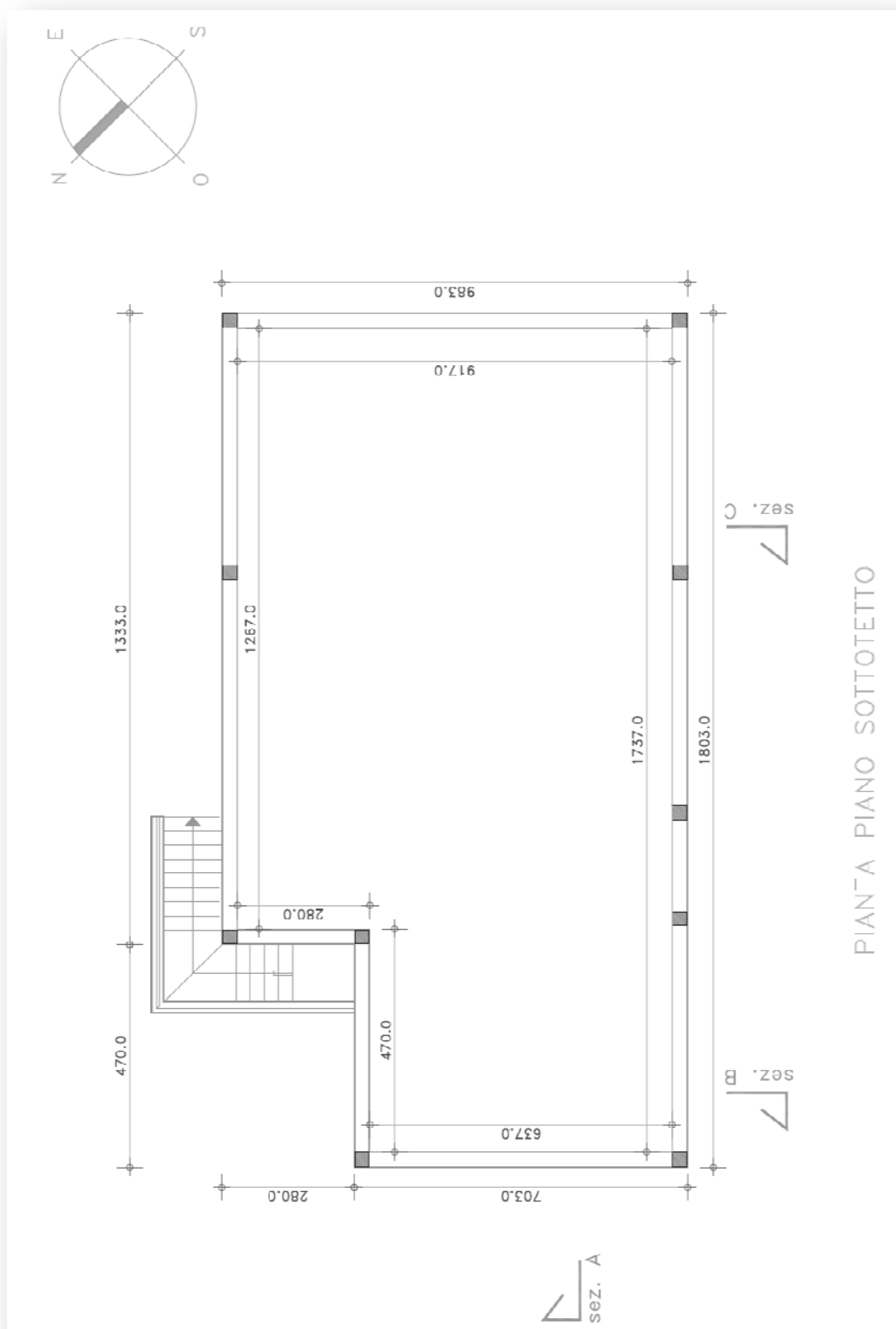


Fig. 4.2.4. Pianta del piano sottotetto.

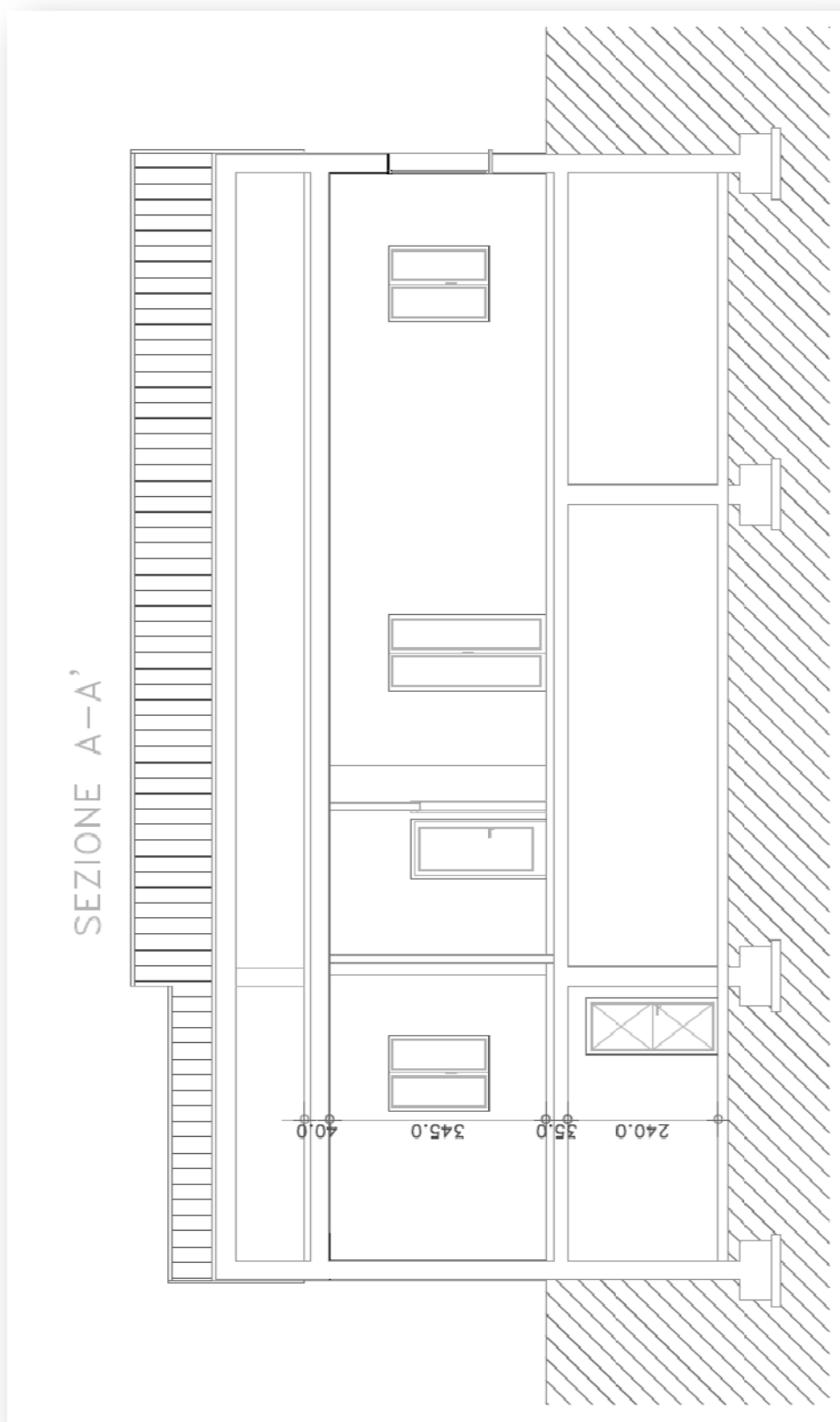


Fig. 4.2.5. Sezione A-A'.

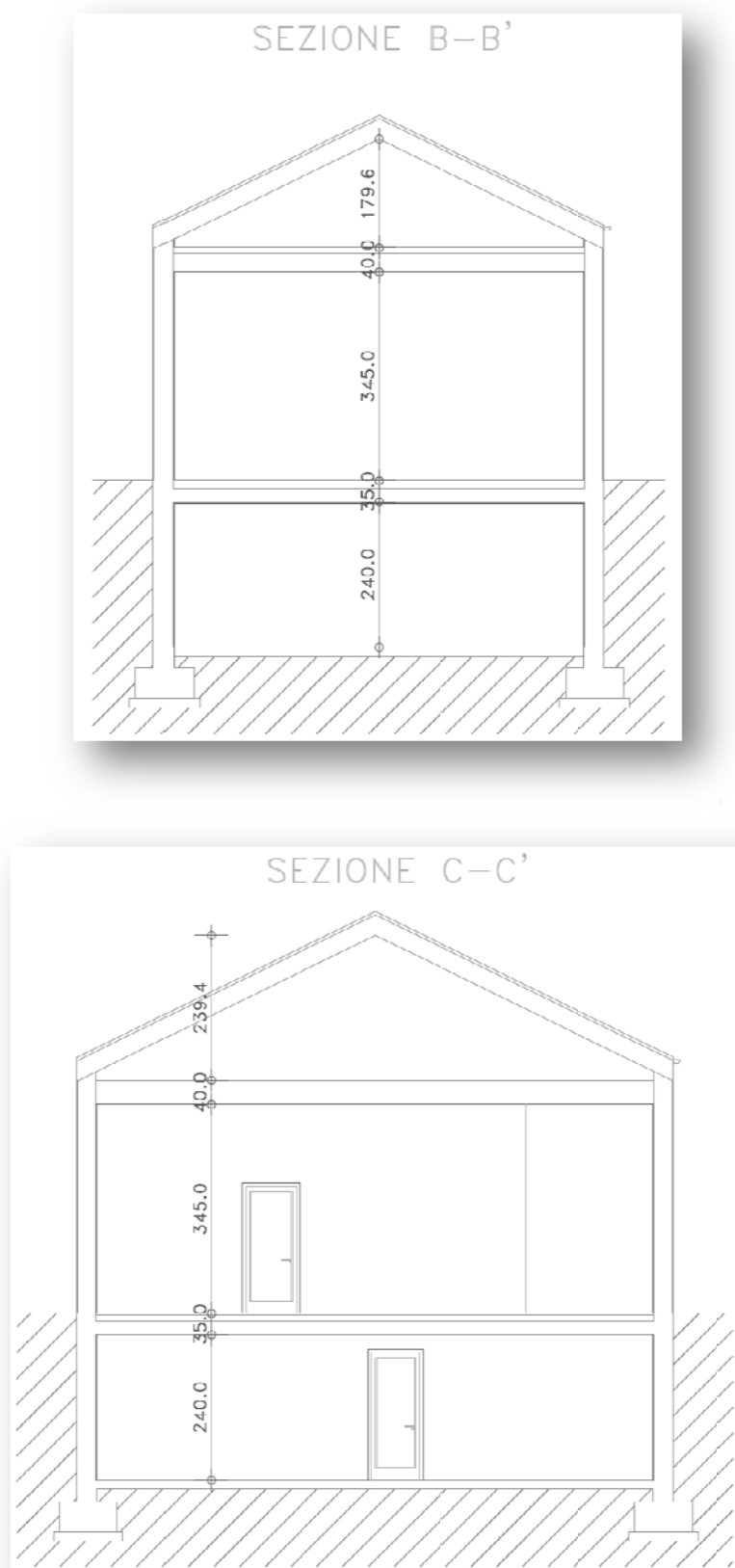


Fig. 4.2.6. Sezioni B-B' e C-C'.

Nello studio si è deciso di localizzare l'edificio a Roma e di attribuire all'involucro edilizio le seguenti caratteristiche termiche sulla base degli spessori indicati dal CTI:

- **Pareti esterne:** blocchi di laterizio alleggerito senza isolamento termico.

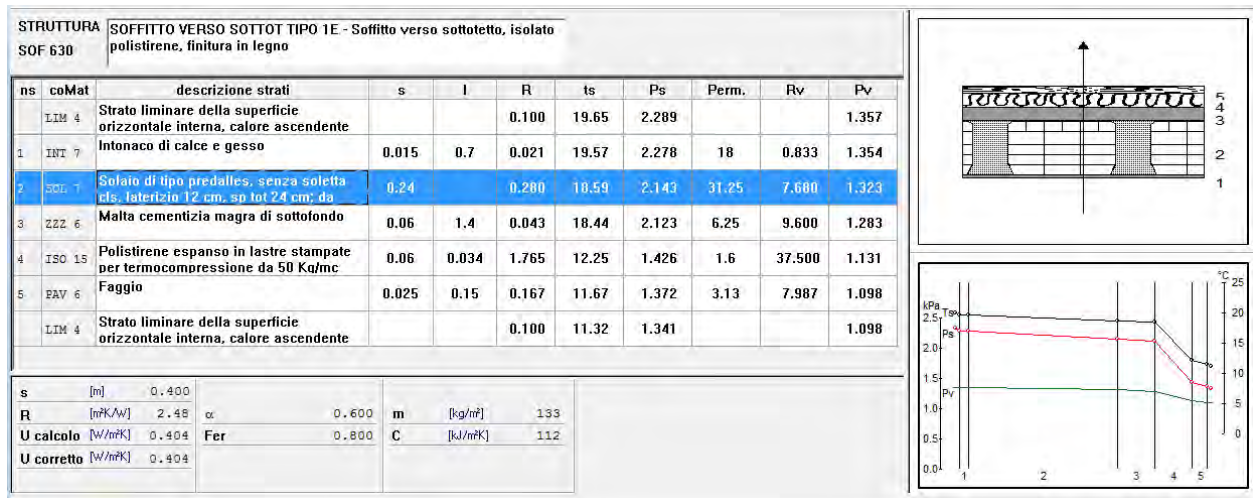


- **Pavimento contro terra:** soletta in latero-cemento con finitura in battuto di cemento senza isolamento e senza camere d'aria.

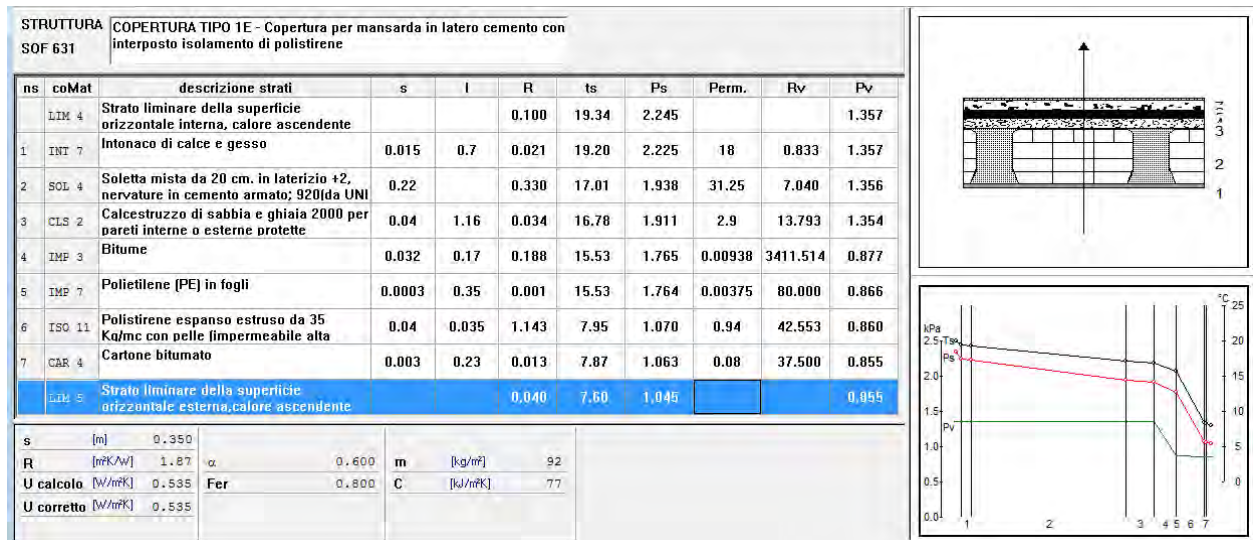




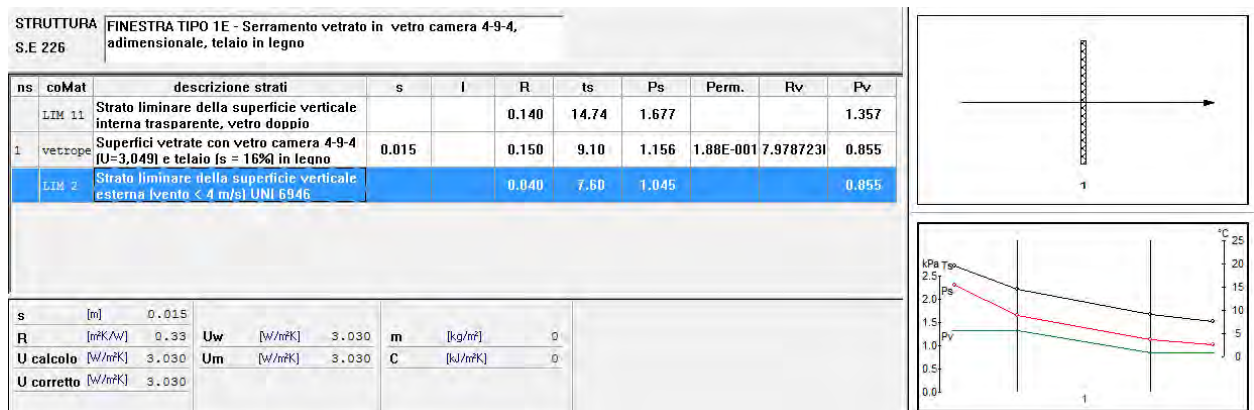
- **Solaio verso sottotetto:** solaio in latero-cemento con finitura in legno e isolamento termico con polistirene.



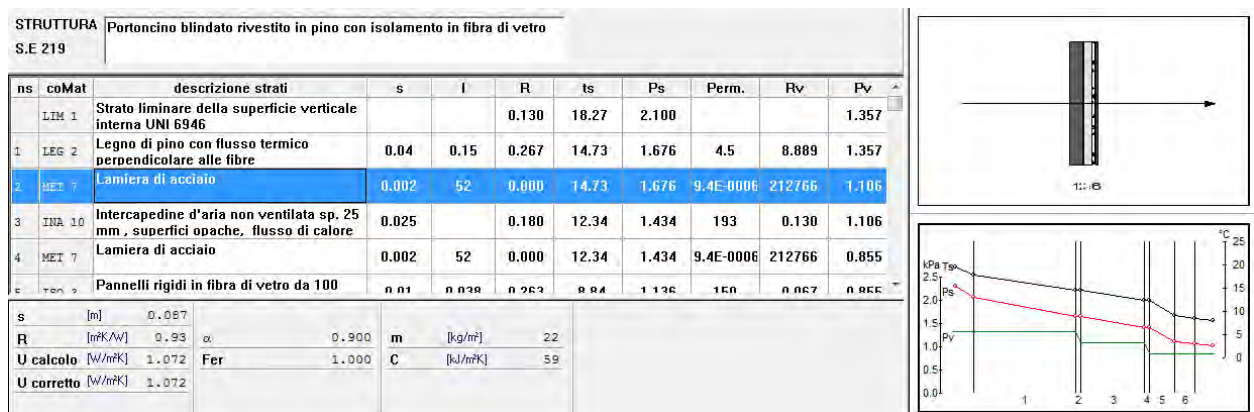
- **Copertura:** solaio in latero-cemento con isolamento in polistirene. Si tratta di un solaio per copertura piana nonostante la copertura sia in realtà a falde. Dal punto di vista del confronto ciò non influisce sulla validità dei risultati.



- **Finestre:** serramenti con vetro-camera e telaio in legno.



- **Portone:** portoncino blindato isolato con fibra di vetro.



Per ciò che riguarda la ventilazione ed i carichi interni sono stati adottati i valori standard previsti dalla norma UNI TS 11300-1 per gli edifici residenziali.

Per ciò che concerne gli impianti si è modellato un generatore di calore costituito da una caldaia a GPL a camera stagna (3 stelle). Il sistema di distribuzione è stato considerato conforme alla Legge 373/76, il sistema di emissione costituito da radiatori su parete esterna non isolata e il sistema di regolazione rappresentato da un doppio regolatore ambiente/climatico di tipo on/off. Il rendimento medio stagionale complessivo dell'impianto è risultato essere pari a 0,769.

Sulla base dei dati inseriti è stato svolto il calcolo con i tre software, avendo cura di uniformare i dati ai diversi schemi di input e alle diverse filosofie di calcolo in fatto, per esempio, di ponti termici, misure nette e lorde, carichi interni, parametri di trasmittanza solare dei componenti finestrati, ecc.

I risultati del calcolo sono riportati nella tabella seguente, distinti per ciascun mese e dettagliati per le singole componenti del bilancio termico.

<b>NOVEMBRE</b>							
	Qtr [kWh]	Qve [kWh]	Qint [kWh]	Qsol [kWh]	Qnd [kWh]	Qp [kWh]	Errore Archi-En.
Archi-Energy	2'734	457	324	912	2'031	2'641	
Termus CE	2'720	456	323	867	2'045	2'699	-2.1%
Stima 10	2'701	455	324	940	1'987	2'584	2.2%
<b>DICEMBRE</b>							
	Qtr [kWh]	Qve [kWh]	Qint [kWh]	Qsol [kWh]	Qnd [kWh]	Qp [kWh]	Errore Archi-En.
Archi-Energy	4'125	708	335	725	3'793	4'932	
Termus CE	4'117	707	334	689	3'814	5'049	-2.3%
Stima 10	4'091	705	335	743	3'745	4'869	1.3%
<b>GENNAIO</b>							
	Qtr [kWh]	Qve [kWh]	Qint [kWh]	Qsol [kWh]	Qnd [kWh]	Qp [kWh]	Errore Archi-En.
Archi-Energy	4'581	791	335	834	4'225	5'493	
Termus CE	4'576	790	334	793	4'254	5'633	-2.5%
Stima 10	4'547	788	335	859	4'170	5'421	1.3%
335							
<b>FEBBRAIO</b>							
	Qtr [kWh]	Qve [kWh]	Qint [kWh]	Qsol [kWh]	Qnd [kWh]	Qp [kWh]	Errore Archi-En.
Archi-Energy	3'789	651	302	967	3'213	4'178	
Termus CE	3'783	650	302	919	3'243	4'292	-2.7%
Stima 10	3'759	648	302	989	3'169	4'120	1.4%
<b>MARZO</b>							
	Qtr [kWh]	Qve [kWh]	Qint [kWh]	Qsol [kWh]	Qnd [kWh]	Qp [kWh]	Errore Archi-En.
Archi-Energy	3'247	549	335	1'395	2'212	2'876	
Termus CE	3'234	548	334	1'324	2'238	2'955	-2.7%
Stima 10	3'213	546	335	1'430	2'171	2'822	1.9%
<b>APRILE</b>							
	Qtr [kWh]	Qve [kWh]	Qint [kWh]	Qsol [kWh]	Qnd [kWh]	Qp [kWh]	Errore Archi-En.
Archi-Energy	1'010	164	162	829	413	536	
Termus CE	1'001	163	162	787	414	540	-0.7%
Stima 10	993	163	162	853	403	524	2.4%
<b>TOTALE STAGIONALE</b>							
	Qtr [kWh]	Qve [kWh]	Qint [kWh]	Qsol [kWh]	Qnd [kWh]	Qp [kWh]	Errore Archi-En.
Archi-Energy	19'485	3'320	1'793	5'662	15'887	20'656	
Termus CE	19'430	3'313	1'789	5'379	16'008	21'168	-2.4%
Stima 10	19'304	3'305	1'793	5'814	15'645	20'340	1.6%

Fig. 4.2.7. Tabelle di confronto dei tre software per l'edificio CTI 1E.

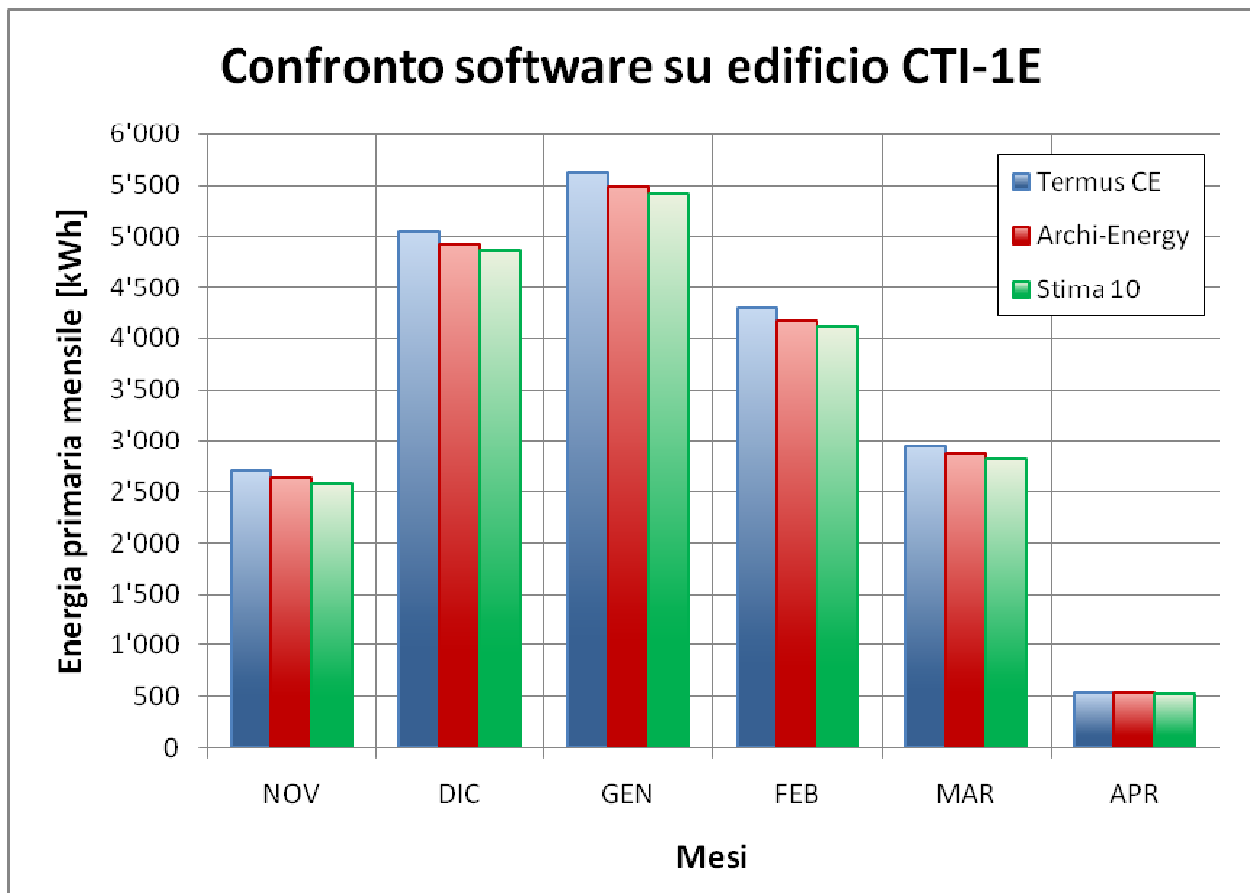


Fig. 4.2.8. Grafico di confronto del fabbisogno di energia primaria per climatizzazione invernale dell'edificio caso studio CTI 1E calcolato con i tre diversi software.

**In conclusione si può affermare che Archi-Energy, fornendo un risultato che intermedio tra i due software Stima 10 e Termus, con uno scostamento percentuale massimo del -2.4% rispetto a Termus e del +1.6% rispetto a Stima 10, può essere considerato affidabile e conforme alle norme UNI TS 11300.**

## **Capitolo 5**

# **Applicazione su grande scala alla città di Roma**

## 5.1 Introduzione

Roma è il comune più popoloso e più esteso d'Italia: oltre 2,7 milioni di residenti su una superficie di oltre 1,280 km<sup>2</sup>. Secondo il nuovo censimento ISTAT del 2011 in esso sono presenti oltre 1,1 milioni di abitazioni. I consumi energetici della sola edilizia residenziale rappresentano circa il 35% del totale e comportano l'immissione in atmosfera di oltre 2 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> ogni anno, pari a quella che si produrrebbe dalla respirazione di circa 11 milioni di persone.

Queste premesse hanno spinto l'amministrazione comunale ad aderire nel 2010 al Patto dei Sindaci (*Covenant of Mayors*), impegnandosi alla riduzione delle sue emissioni di CO<sub>2</sub> del 20% entro il 2020. Per dare seguito all'impegno il Comune ha incaricato il centro di ricerca C.I.T.E.R.A.<sup>1</sup> di seguire, come consulente esterno, la stesura del *Sustainable Energy Action Plan* (SEAP), contenente le azioni pratiche per il raggiungimento dell'obiettivo. Nel processo di stesura del documento il centro di ricerca si è avvalso dell'importante contributo del Chiar.mo Prof. Jeremy Rifkin, il quale, con il suo team, ha elaborato un *Masterplan* per l'energia sostenibile a Roma nel quale ha illustrato i principi ispiratori ed i principali indirizzi verso cui rivolgere le azioni di miglioramento energetico. Su tali premesse è stato elaborato il SEAP che è stato approvato in giunta comunale il 19/19/2011.

In questo contesto si inserisce il presente studio sui fabbisogni energetici dell'edilizia residenziale romana, il quale costituisce parte integrante del SEAP.

---

<sup>1</sup> Centro Interdisciplinare Territorio Edilizia Restauro Ambiente. Istituito presso la facoltà di Architettura, Università Sapienza e presieduto dal **Prof. Ing. Livio De Santoli**

## 5.2 Obiettivo

L'obiettivo contenuto nel SEAP per l'edilizia residenziale consiste nella riduzione del 20% delle emissioni di CO<sub>2</sub> imputabili alla climatizzazione invernale entro il 2020. Il rispetto di tale vincolo rende necessaria una caratterizzazione energetica del parco edilizio esistente ed uno studio strategico di medio e lungo periodo sui possibili scenari evolutivi legati ai diversi modelli di sviluppo. L'obiettivo è di prevedere l'evoluzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> sia secondo l'attuale tendenza, sia in relazione a scenari alternativi caratterizzati da strategie d'azione più o meno incisive.

Il fine ultimo è di determinare l'entità degli interventi che si rendono necessari per il rispetto degli impegni del *Patto dei Sindaci* e di individuarne la combinazione ottimale per permettere il raggiungimento degli obiettivi col minor dispendio di risorse.

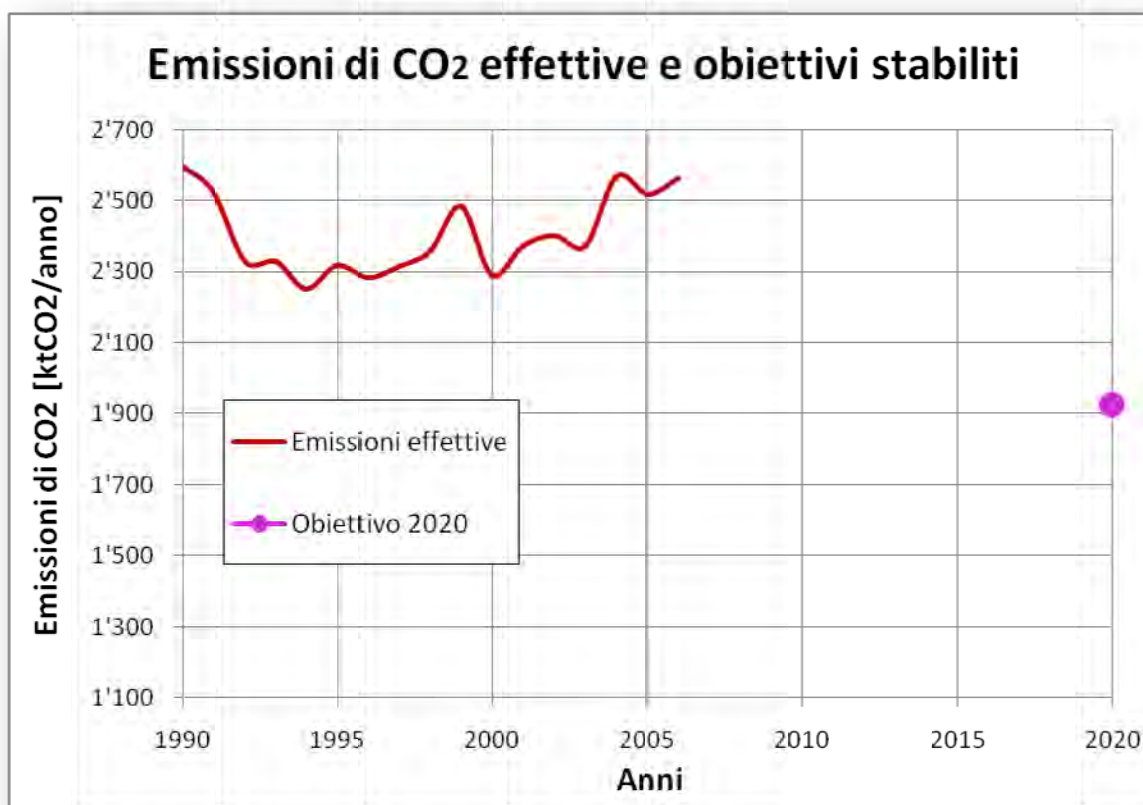


Fig. 5.2.1. Emissioni di CO<sub>2</sub> effettive della città di Roma per riscaldamento e obiettivo del Patto dei Sindaci al 2020.



### **5.3 Fabbisogno energetico del patrimonio edilizio esistente**

Il fabbisogno energetico di climatizzazione invernale di un edificio dipende da diversi fattori: dal clima, dalle caratteristiche architettoniche e termiche dell'involucro, dalla tipologia di impianto termico, dagli apporti gratuiti (solari e interni) nonché da parametri assai imprevedibili come il comportamento più o meno virtuoso degli occupanti. Data la vastità del patrimonio edilizio della città di Roma, appare chiara l'impossibilità di valutare analiticamente i consumi energetici di ogni singolo edificio. D'altronde la necessità di ottenere risultati attendibili pone fortemente l'accento sulla selezione ed elaborazione dei dati aggregati disponibili.

La metodologia di calcolo prescelta si articola secondo i seguenti punti:

- Suddivisione degli edifici esistenti per epoca di costruzione.
- Individuazione della tipologia edilizia per gli edifici delle diverse epoche.
- Determinazione delle superfici disperdenti complessive per gli edifici di ogni epoca mediante elaborazione dei dati disponibili.
- Individuazione delle tipologie impiantistiche per gli edifici delle diverse epoche.
- Applicazione degli algoritmi di calcolo energetico.

### 5.3.1 Dati di origine sul parco edilizio

Nel presente studio la base di dati più ampia deriva dal “Censimento ISTAT 2001 della popolazione e delle abitazioni” che al momento di realizzazione del modello era il più recente. Le tabelle di maggiore interesse riguardano:

- Numero di abitazioni occupate da residenti VS Classi di superficie.
- Numero di edifici ad uso abitativo VS Numero abitazioni VS Numero piani fuori terra.
- Numero di edifici VS Epoca di costruzione VS Stato di conservazione
- Abitazioni occupate da persone residenti con impianto di riscaldamento VS Tipologia di impianto

Il censimento suddivide gli edifici per epoca di costruzione secondo i seguenti scaglioni:

- Prima del 1919
- Dal 1919 al 1945
- Dal 1946 al 1961
- Dal 1962 al 1971
- Dal 1972 al 1981
- Dal 1982 al 1991
- Dopo il 1991

Tale divisione risulta sufficientemente dettagliata per gli scopi della presente ricerca. Al contrario i dati hanno un'estensione temporale limitata in quanto si fermano agli anni '90. Sarà quindi necessaria un'elaborazione per ricavare anche i valori più recenti, come verrà esposto in seguito.

### 5.3.2 **La geometria degli edifici e la formazione dei tipi**

I dati provenienti dal censimento, sebbene preziosi, non sono sufficienti per determinare le superfici disperdenti. Infatti non sono riportate informazioni sulla geometria degli edifici. Si è proceduto quindi ad uno studio sulle tipologie edilizie per riuscire a dare forma agli edifici descritti dal censimento [Mancini, De Santoli, 2003].

La costruzione degli elementi che definiscono l'involucro è estremamente varia. Nel corso dei secoli il modo di costruire si è lentamente modificato, mantenendo forme tradizionali di esecuzioni, ed aggiungendo sempre nuove tecnologie realizzative. Questo ha portato ad avere compresenti, nella normale prassi di costruzione, una notevole gamma di diverse possibili esecuzioni. Se a questo si aggiunge che ogni progetto di costruzione è un evento singolo, non esistendo produzioni di serie o assimilabili, ci troviamo di fronte a una varietà di costruzioni che rende difficile una semplificazione necessaria al controllo e alla valutazione, anche solo dal punto di vista energetico.

E' quindi ritenuta necessaria la formazione di un abaco teorico delle possibili configurazioni che un volume può assumere (l'edificio), aggregando in modo semplice un numero via via crescente di unità abitative (appartamenti). Per farlo si sono disposte queste ultime su un numero di piani variabile da un minimo di un piano fino al numero massimo di piani ottenibile disponendo due appartamenti per piano. Da ciò sono risultate molteplici combinazioni possibili.

Nella composizione si è fatto in modo di rispecchiare soluzioni reali, considerando una profondità del volume media di 12 m, tranne nei casi di edifici compatti (palazzine e torri), per i quali la consuetudine costruttiva è quella di realizzare strutture più profonde, andando ad inserire delle chiostrine per permettere l'aereazione dei locali più interni.

La dimensione delle unità abitative è stata considerata di  $120 \text{ m}^2$ . Dimensione questa che può facilmente considerarsi somma di 3 appartamenti piccoli da  $40 \text{ m}^2$ , o di due da  $60 \text{ m}^2$  o di 2 uno da  $80$  e l'altro di  $40 \text{ m}^2$ .

Questo modello teorico rappresenta chiaramente una semplificazione dell'esistente, ma ciò ha reso possibile controllare e misurare una varietà molto grande di tipologie: da abitazioni di poche famiglie a edifici contenenti più di 60 abitazioni, siano essi disposti su un piano o a formare una torre, cosa questa che attraverso il rilievo di esempi reali avrebbe richiesto tempi molto più lunghi.

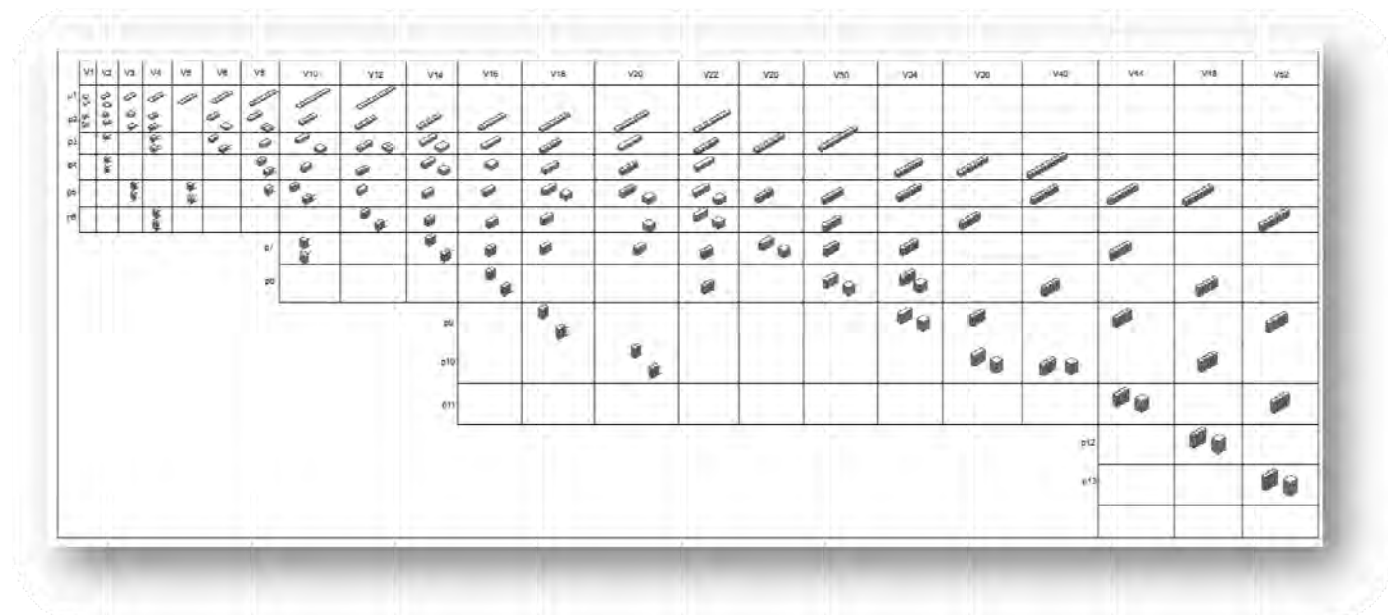


Fig. 5.3.1. Abaco riepilogativo delle geometrie esaminate

Dalle basi appena definite sono stati calcolati:

- Fattore di forma di ogni volume
- Superficie disperdente totale
- Percentuale delle superfici disperdenti rispetto alla superficie disperdente totale:

% superficie copertura

% superficie di contatto con il terreno

% superficie vetrata

% superficie opaca verticale

Il passo successivo è stata la formazione di gruppi uniformi secondo il fattore di forma. Di seguito è riportato graficamente come appaiono le classi uniformi e la loro corrispondenza con il numero di piani, numero di abitazioni e loro superficie.

Ad ogni gruppo uniforme si è potuto associare un gruppo di valori indicanti l'incidenza percentuale in superficie per ogni elemento dell'involucro. Questo è stato fatto considerando in prima approssimazione 3 situazioni differenti di superficie vetrata: 15%, 20%, 30%. I valori delle percentuali di superficie si riferiscono ad edifici liberi, non confinanti con altri edifici. Serviranno altre informazioni riguardanti l'esposizione e il numero di superfici disperdenti per ricavare un valore più vicino alla realtà nel caso in cui ci si stiano esaminando edifici accorpati con altri.

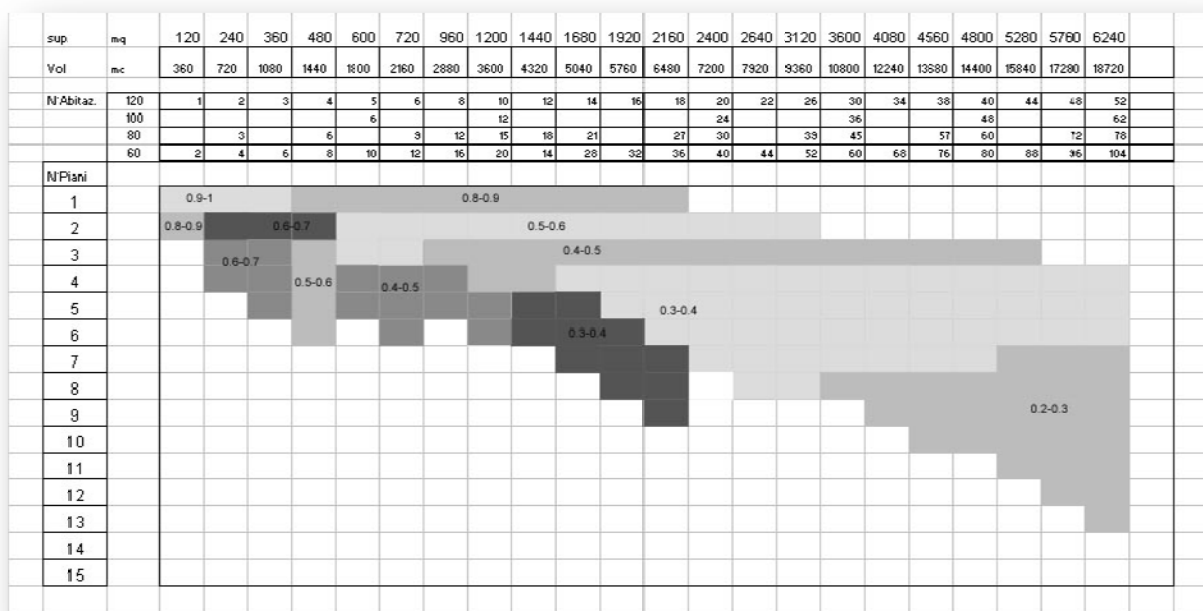


Fig. 5.3.2. Raggruppamento per fattore di forma

Fattore di Forma					av/ap=0,2
	Sup. opaca verticale	Sup. copertura	Sup. a terra	Sup vetrata	
0,9-1	22	36	36	6	
0,8-0,9	18	39	39	4	
0,7-0,8					
0,6-0,7	38	26	26	9	
0,5-0,6	32	30	30	8	
0,4-0,5	39	25	25	10	
0,3-0,4	50	19	19	12	
0,2-0,3	60	12	12	15	

Fattore di Forma					av/ap=0,15
	Sup. opaca verticale	Sup. copertura	Sup. a terra	Sup vetrata	
0,9-1	24	36	36	4	
0,8-0,9	19	39	39	3	
0,7-0,8					
0,6-0,7	40	26	26	7	
0,5-0,6	33	30	30	6	
0,4-0,5	42	25	25	7	
0,3-0,4	53	19	19	9	
0,2-0,3	64	12	12	11	

Fattore di Forma					av/ap=0,30
	Sup. opaca verticale	Sup. copertura	Sup. a terra	Sup vetrata	
0,9-1	20	36	36	8	
0,8-0,9	16	39	39	7	
0,7-0,8					
0,6-0,7	33	26	26	14	
0,5-0,6	28	30	30	12	
0,4-0,5	35	25	25	15	
0,3-0,4	43	19	19	19	
0,2-0,3	53	12	12	23	

Tab. 5.3.1. Rapporti percentuali tra le superfici disperdenti

Altro modo di raggruppare questi volumi è di tenere conto del loro aspetto, della loro riconoscibilità. Si sono formate così 5 classi tipologiche generali ulteriormente divise, fino ad arrivare ad un numero di 12 (ved. tabelle nelle pagine seguenti). Anche queste sono state riportate su grafico e relazionate con il numero di piani e abitazioni.

A questo punto, partendo dal riconoscimento della tipologia edilizia a cui appartiene un generico edificio oggetto di studio, dal numero di piani e dal numero di appartamenti, si può risalire all'area delle superfici disperdenti, sovrapponendo il grafico delle tipologie per aspetto a quello delle tipologie per fattore di forma .

<b>Tipologia 1</b> Blocco piccolo isolato	1A Villino monofamiliare
	2A Villino bifamiliare
<b>Tipologia 2</b> Blocco isolato	2A- Palazzina piccola
	2B- Palazzina
	2C- Palazzo
<b>Tipologia 3</b> Torre	Torre
<b>Tipologia 4</b> Blocco accorpato continuo	4A- Casa a schiera
	4B- Casa in linea bassa
	4C- Casa in linea alta
<b>Tipologia 5</b> Blocco accorpato tipo storico	5A- Blocco accorpato (fronte 5-6m)
	5B- Blocco accorpato (fronte 10-12m)
	5C- Blocco accorpato (fronte 20-24m)

Tab. 5.3.2: Schema di raggruppamento secondo l'aspetto formale

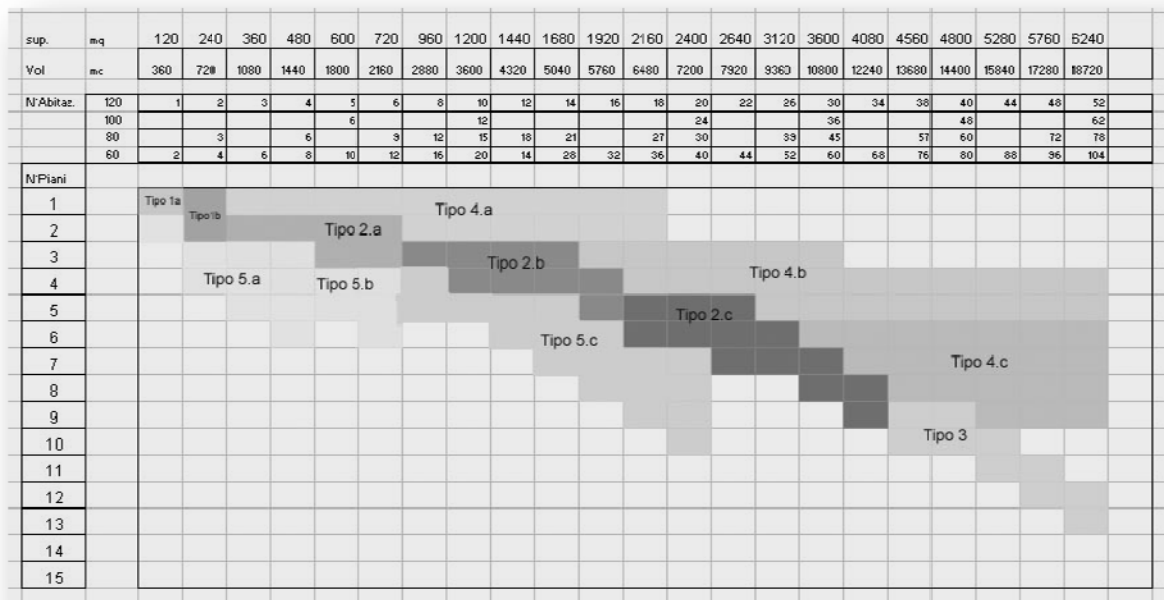


Fig. 5.3.3. Raggruppamento per aspetto formale







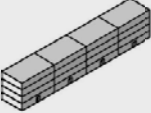
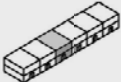
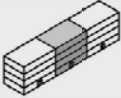
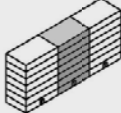



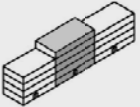
Blocco piccolo isolato			
	1A- Villino monofamiliare	1/2 piani	
	1B- Villino bifamiliare	1/2 piani	
Blocco isolato			
		2A- Palazzina piccola	3/6 appartamenti 2/3 piani
		2B- Palazzina	8/16 appartamenti 3/5 piani
		2C- Palazzo	>16 appartamenti 6/9 piani
Torre			
	3 -Torre	>8 piani	
Blocco accorpato continuo			
		4A- Casa a schiera	1/2 pianii
		4B- Casa in linea	13/5 piani
		4C- Casa in linea	6/9 piani
Blocco accorpato tipo storico			
		5A- Fronte di 5/6m	2/6 piani
		5B- Fronte di 10/12m	5/8 piani
		5C- Fronte di	6/9 piani

Fig. 5.3.4. Schema di raggruppamento degli edifici



Grazie a questo studio è quindi possibile dare forma agli edifici descritti sul censimento. In particolare, conoscendo il numero di interni ed i piani fuori terra per ogni edificio, sapendo la superficie in pianta media di ognuno (pari a  $84,3 \text{ m}^2$ ) e fissando un'altezza interpiano media di 3,2 metri, si è potuto ricavare il rapporto S/V (Superficie disperdente / Volume) di ogni categoria. La superficie trasparente è stata poi individuata considerando un rapporto "Superficie vetrata / Superficie in pianta" pari a 0,15. La superficie opaca è stata quindi determinata per sottrazione. Analogamente è stata determinata la superficie a terra e quella di copertura.

I dati ricavati, validi fino al 1991, sono poi stati estesi agli anni successivi, fino al 2020. L'evoluzione delle nuove costruzioni è stata calcolata adottando il tasso di crescita annuale riportato sul Nuovo Piano Regolatore di Roma adottato nel 2008, pari allo 0,68% all'anno.

### 5.3.3 Caratteristiche prestazionali dell'involucro edilizio

Dopo aver definito gli aspetti geometrici dell'involucro è necessario associare a ciascuna epoca di costruzione una o più tipologie edilizie con i relativi valori di prestazione energetica dei componenti.

Riguardo alle **pareti opache** si riportano alcune valutazioni effettuate sul patrimonio edilizio di Roma.

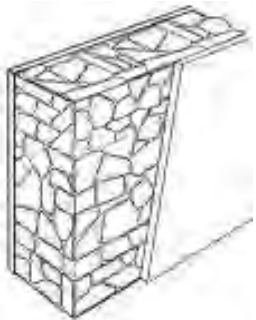

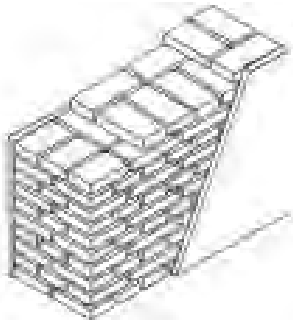
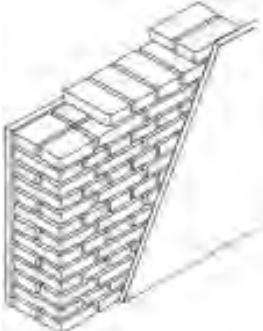
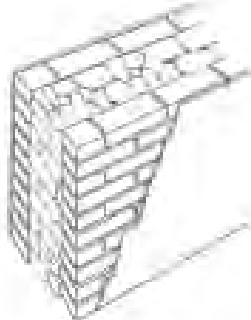



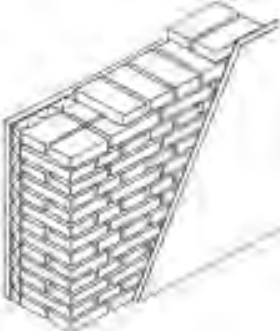
Una possibile suddivisione dei periodi storici, in funzione dell'evoluzione della tipologia costruttiva delle pareti perimetrali, mostra tre epoche:

- I        fino al 1910, con la presenza di strutture in muratura portante realizzate con diverse tecnologie.
  
- II       dal 1910 al 1970, convivono muratura portante e strutture in cemento armato. All'antico ruolo della parete portante si sostituisce quello di parete di tamponamento esterno, con esiti dal punto di vista del controllo del clima interno, non sempre soddisfacenti (Una suddivisione ulteriore del periodo (1910 - 1945 e 1946 – 1970) dovrebbe inserire informazioni supplementari sulla prefabbricazione).
  
- III      dopo il 1970, con il predominio delle strutture in cemento armato, alle pareti esterne è affidato esclusivamente il ruolo di chiusura perimetrale non portante.


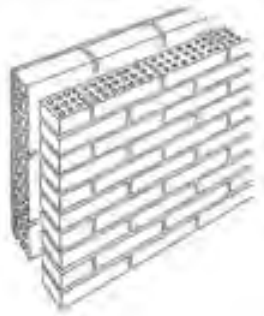
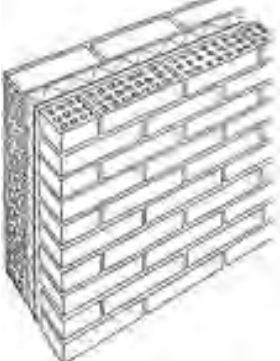
A seguito della promulgazione della legge n° 10/91 sul "contenimento dei consumi energetici degli edifici" le prestazioni richieste alle pareti esterne sono aumentate. Nel frattempo, si è risvegliato l'interesse verso la muratura portante come sistema strutturale, nelle nuove costruzioni.

Di seguito sono rappresentati alcuni tipi di pareti opache perimetrali, caratteristiche del modo di costruire a Roma (e nel Lazio), in funzione dell'epoca di costruzione, e della tipologia costruttiva.

Muratura portante

<p><b>I</b> <b>Fino al 1910</b></p>	 <p>Fig. I A: muratura portante in pietra faccia vista o intonacata</p>	 <p>Fig. I B: muratura portante a sacco (in pietrame) con paramento in mattoni, intonacata o faccia vista</p>	 <p>Fig. I C: muratura portante in mattoni a tre teste faccia vista o intonacati</p>
<p><b>II</b> <b>Dal 1910 al 1970</b></p>	 <p>Fig. II A: muratura portante in mattoni a due teste faccia vista o faccia vista o intonacati</p>	 <p>Fig. II B: muratura portante a sacco (in tufo) con paramento in mattoni, intonacata o faccia vista</p>	 <p>Fig. II C: muratura portante a sacco (in tufo) con paramento esterno in mattoni, intonacata o faccia vista</p>
<p><b>III</b> <b>Dopo il 1970</b></p>	 <p>Fig. III A: muratura portante in blocchi faccia vista o intonacati, isolante nell'intercapedine e fodera interna in elementi forati</p>	 <p>Fig. III B: muratura portante armata in blocchi faccia vista o intonacati</p>	 <p>Fig. III C: muratura portante in mattoni pieni (a due teste) faccia vista o intonacati, isolante "a cappotto" e fodera interna in elementi forati</p>

Cemento armato

<p><b>II</b> Dal 1910 al 1970</p>	 <p>Fig.II A: Muratura di tamponamento con doppia parete in laterizio, intercapedine d'aria e rivestimento interno/esterno in intonaco</p>	 <p>Fig.II B: Muratura di tamponamento con doppia parete in laterizio faccia vista, intercapedine d'aria e rivestimento interno in intonaco</p>
<p><b>III</b> Dopo il 1970</p>	 <p>Fig.III A: Muratura di tamponamento con doppia parete in laterizio faccia vista, isolante nell'intercapedine e rivestimento interno in intonaco</p>	

In base allo studio effettuato sono stati attribuiti i seguenti parametri ai componenti dell'involucro edilizio.

Epoca di costruzione	Trasmittanza pareti opache verticali [W/m <sup>2</sup> K ]	Trasmittanza solai di copertura [W/m <sup>2</sup> K ]	Trasmittanza pavimenti contro terra [W/m <sup>2</sup> K ]	Trasmittanza chiusure trasparenti [W/m <sup>2</sup> K ]
< 1919	1.25	1.70	1.20	5.50
1919-45	1.25	1.40	1.35	5.50
1946-61	1.30	1.40	1.30	5.50
1962-71	1.25	1.30	1.20	5.00
1972-81	1.10	1.10	1.00	5.00
1982-91	1.00	1.00	0.80	5.00
1992-2001	0.80	0.85	0.60	4.00
2002-2006	0.80	0.80	0.60	3.00
2006-2009	0.45	0.40	0.43	3.00
2010-2012	0.36	0.32	0.36	2.40
2012-2020	0.36	0.32	0.36	2.40

Tab. 5.3.3. Trasmittanze termiche medie degli edifici per epoca di costruzione.

### 5.3.4 Caratteristiche prestazionali degli impianti di riscaldamento

Come per l'involucro, anche sugli impianti è stato effettuato uno studio per valutare le tipologie impiantistiche più ricorrenti negli edifici delle varie epoche. Per ogni epoca di costruzione è stato quindi calcolato il rendimento medio dei vari sottosistemi che compongono l'impianto: generazione, distribuzione, emissione e regolazione.

In questo caso è stata presa in considerazione anche un variabile aggiuntiva. Gli impianti, infatti, sono sistemi che vengono rinnovati con cadenza molto più breve rispetto agli involucri. In particolare alcuni componenti, come i generatori di calore o i sistemi di emissione e regolazione hanno periodi di rinnovo di alcune decine di anni. Ciò ha complicato il calcolo infatti è stato necessario inserire nel modello un tasso di ristrutturazione degli impianti per poter ottenere risultati attendibili anche con gli edifici più datati, nei quali già sono avvenuti interventi di ammodernamento degli impianti. Si riportano di seguito i risultati.

RENDIMENTO DI PRODUZIONE					
Epoca di costruzione	Impianti originari		Impianti già ristrutturati		Rendimento medio ponderato
	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	
< 1919	62.0%	49.3%	85.0%	50.7%	73.7%
1919-45	62.0%	52.7%	85.0%	47.3%	72.9%
1946-61	65.0%	55.3%	85.0%	44.7%	73.9%
1962-71	70.0%	53.8%	85.0%	46.2%	76.9%
1972-81	76.5%	56.6%	85.0%	43.4%	80.2%
1982-91	78.0%	68.8%	85.0%	31.2%	80.2%
1992-2001	80.0%	87.2%	85.0%	12.8%	80.6%
2002-2006	83.0%	90.0%	85.0%	10.0%	83.2%
2006-2009	85.5%	92.0%	85.5%	8.0%	85.5%
2010-2012	88.5%	95.0%	88.5%	5.0%	88.5%
2012-2020	92.0%	100.0%	92.0%	0.0%	92.0%

Tab. 5.3.4. Rendimento di produzione degli impianti termici attuali per caratteristiche dell'impianto ed epoca di costruzione.

RENDIMENTO DI DISTRIBUZIONE					
Epoca di costruzione	Impianti centralizzati		Impianti autonomi		Rendimento medio ponderato
	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	
< 1919	89.0%	53.7%	96.0%	46.3%	92.2%
1919-45	89.0%	53.7%	96.0%	46.3%	92.2%
1946-61	89.0%	53.7%	96.0%	46.3%	92.2%
1962-71	89.0%	53.7%	97.0%	46.3%	92.7%
1972-81	91.0%	53.7%	97.5%	46.3%	94.0%
1982-91	94.0%	53.7%	98.0%	46.3%	95.9%
1992-2001	96.0%	53.7%	99.0%	46.3%	97.4%
2002-2006	98.0%	53.7%	99.0%	46.3%	98.5%
2006-2009	98.0%	53.7%	99.0%	46.3%	98.5%
2010-2012	98.0%	53.7%	99.0%	46.3%	98.5%
2012-2020	98.0%	53.7%	99.0%	46.3%	98.5%

Tab. 5.3.5. Rendimento di distribuzione degli impianti termici attuali per caratteristiche dell'impianto ed epoca di costruzione.

RENDIMENTO DI EMISSIONE					
Epoca di costruzione	Impianti centralizzati		Impianti autonomi		Rendimento medio ponderato
	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	
Ogni epoca	95.0%	53.7%	95.0%	46.3%	95.0%

Tab. 5.3.6. Rendimento di emissione degli impianti termici attuali per caratteristiche dell'impianto.

RENDIMENTO DI REGOLAZIONE					
Epoca di costruzione	Impianti centralizzati		Impianti autonomi		Rendimento medio ponderato
	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	
< 1919	88.0%	53.7%	93.0%	46.3%	90.3%
1919-45	88.0%	53.7%	93.0%	46.3%	90.3%
1946-61	88.0%	53.7%	93.0%	46.3%	90.3%
1962-71	88.0%	53.7%	93.0%	46.3%	90.3%
1972-81	88.0%	53.7%	93.0%	46.3%	90.3%
1982-91	88.0%	53.7%	93.0%	46.3%	90.3%
1992-2001	88.0%	53.7%	93.0%	46.3%	90.3%
2002-2006	90.0%	53.7%	94.0%	46.3%	91.9%
2006-2009	92.0%	53.7%	95.0%	46.3%	93.4%
2010-2012	93.0%	53.7%	96.0%	46.3%	94.4%
2012-2020	96.0%	53.7%	98.0%	46.3%	96.9%

Tab. 5.3.7. Rendimento di regolazione degli impianti termici attuali per caratteristiche dell'impianto ed epoca di costruzione.

RENDIMENTO GLOBALE IMPIANTO	
Epoca di costruzione	Senza interventi
< 1919	58.3%
1919-45	57.7%
1946-61	58.5%
1962-71	61.2%
1972-81	64.7%
1982-91	65.9%
1992-2001	67.4%
2002-2006	71.5%
2006-2009	74.7%
2010-2012	78.1%
2010-2012	83.4%

Tab. 5.3.8. Rendimento medio stagionale degli impianti termici attuali per epoca di costruzione.



### 5.3.5 Fabbisogno energetico nello stato attuale

Grazie alle considerazioni dei precedenti paragrafi è stato quindi possibile costruire il modello energetico equivalente degli edifici appartenenti alle diverse epoche di costruzione.

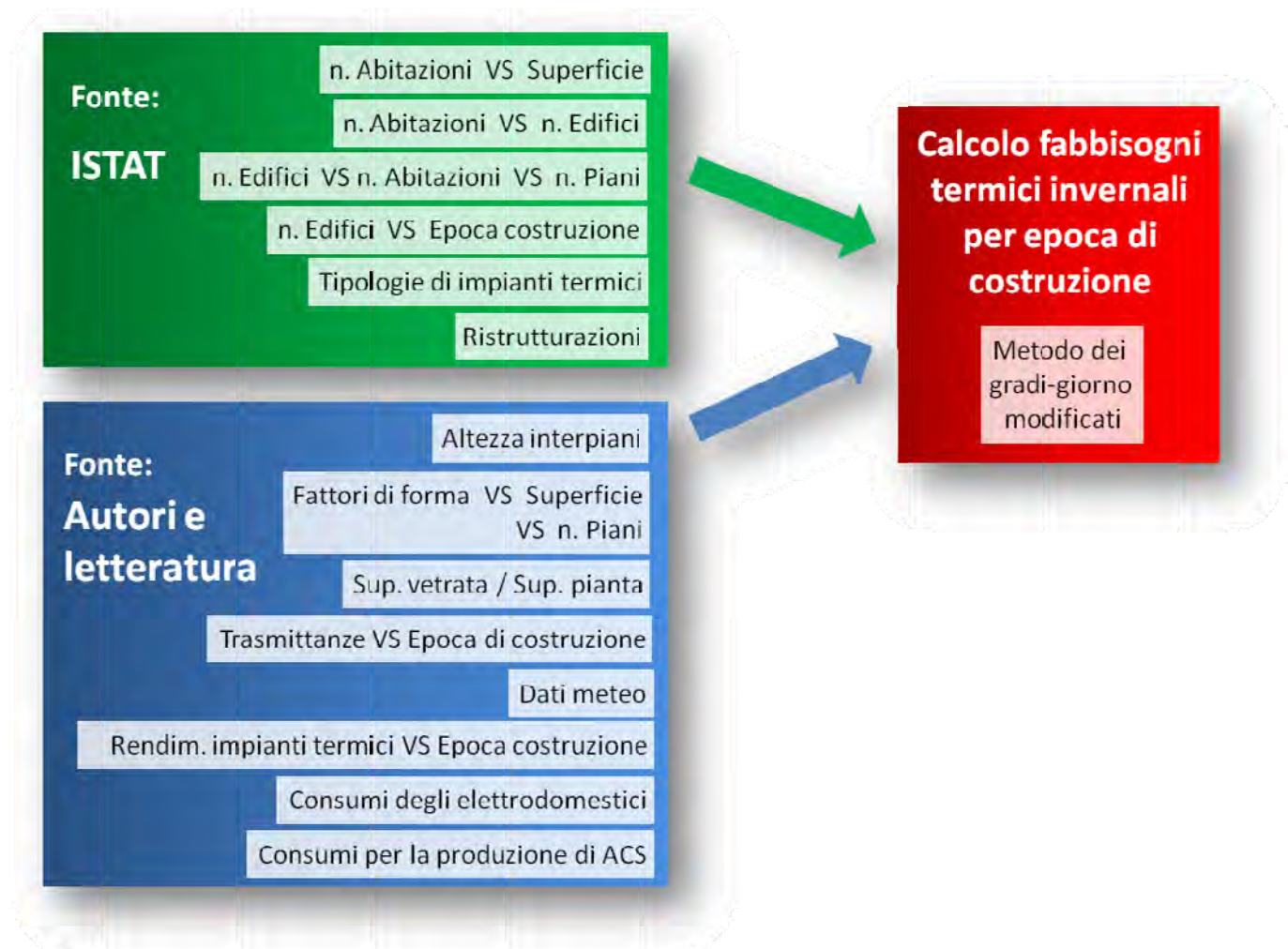


Fig. 5.3.5. Fonti dei dati e metodologia di elaborazione

Dai risultati del calcolo si delinea il ritratto di una città composta principalmente da edifici costruiti nel periodo che va dal dopoguerra agli anni '80 (circa il 55%). Gli edifici precedenti al 1976, anno di promulgazione della prima legge sulla regolamentazione energetica degli impianti, sono più del 60% del totale. Si tratta quindi di un patrimonio edilizio per la gran parte costruito senza alcuna attenzione alle problematiche

energetiche o comunque con un'attenzione assai inferiore allo standard attuale. La trasmittanza termica dell'involucro richiesta dal DLgs 192/05 e sue modifiche e integrazioni, obbligatoria per le nuove costruzioni, è inferiore alla metà di quella degli edifici anteriori agli anni '90, con la sola esclusione degli edifici più antichi muniti di murature più consistenti. Parimenti il rendimento termico dei nuovi impianti di riscaldamento è il 15-20% più alto rispetto a quello degli impianti più datati. Il risultato è che su un fabbisogno energetico complessivo di riscaldamento nel 2009 pari a circa 9'500 GWh/anno (responsabile dell'emissione di 2,2 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub>), quasi l'80% è imputabile a edifici anteriori al 1976. Vi è quindi una sproporzione evidente tra il numero di edifici ante '76 ed i relativi fabbisogni energetici. Ciò è indice di un pessimo utilizzo delle risorse energetiche.

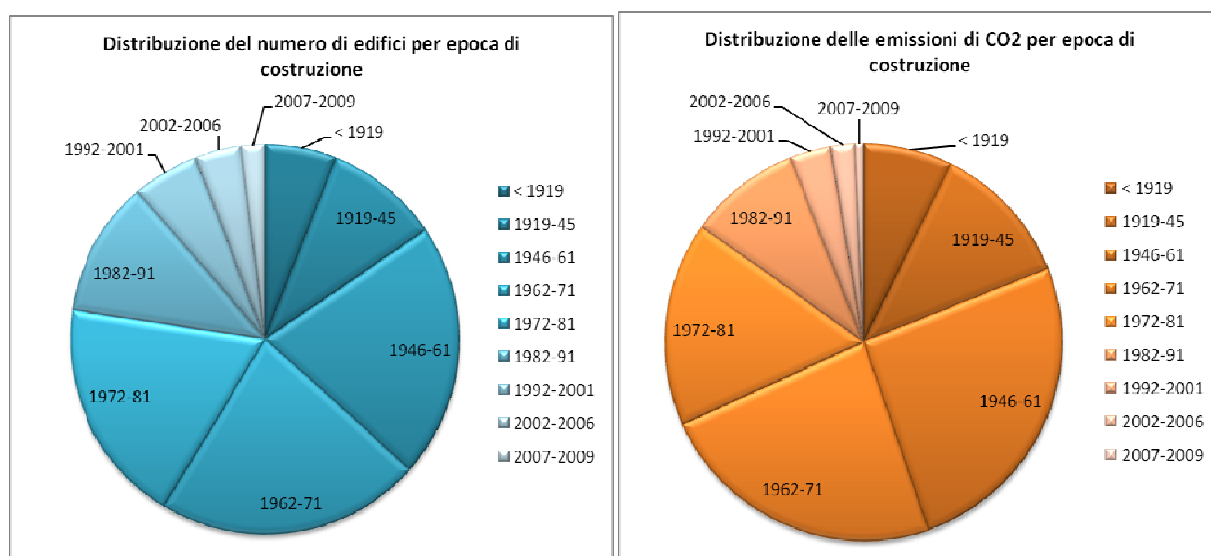


Fig. 5.3.6. Composizione del parco edilizio romano a seconda del numero di edifici (sinistra) e delle emissioni (destra), per epoca di costruzione.

Lo stesso dato può essere riscontrato in modo ancora più evidente confrontando i valori degli indici di fabbisogno specifico di energia primaria per climatizzazione invernale (EP<sub>i</sub>) per le diverse epoche. A fronte dello standard attuale inferiore a 40 kWh/m<sup>2</sup>anno si registrano valori vicini a 130 kWh/m<sup>2</sup>anno per gli edifici meno efficienti, ognuno dei quali produce tanta CO<sub>2</sub> quanta ne produrrebbero tre edifici moderni di pari superficie. Il valore medio si attesta a circa 106 kWh/m<sup>2</sup>anno. In altre parole, gli edifici esistenti, se

classificati secondo le recenti direttive sulla certificazione energetica, sarebbero tutti al di sotto della classe 'D', ad eccezione di quelli successivi al Dlgs 192/2005. In particolare gli edifici anteriori agli anni '70 si posizionerebbero mediamente in classe 'G', quelli tra '70 e '90 in classe 'F' e quelli tra '90 e 2005 in classe 'E'. Si ribadisce che questi risultati sono frutto di un modello matematico di stima delle condizioni energetiche medie e pertanto sono affetti da un certo grado di incertezza.

Epoca di costruz.	Distribuzione percentuale sul parco edifici [%]	FABBISOGNI ed EMISSIONI complessive				Classe energetica di riferimento (EPI)
		[GWh/anno]	[TEP/anno]	[ktCO2/anno]	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	
< 1919	5.8%	699	69'388	162	130	G
1919-45	9.4%	1'132	112'309	263	130	G
1946-61	20.7%	2'480	246'087	575	129	G
1962-71	21.6%	2'262	224'395	525	113	G
1972-81	18.3%	1'600	158'737	371	94	F
1982-91	11.0%	878	87'140	204	86	F
1992-2001	5.4%	326	32'374	76	65	E
2002-2006	3.8%	191	18'997	44	55	E
2007-2009	2.0%	67	6'641	16	37	C
2010-2012	2.0%	50	5'004	12	27	B
<b>TOTALE</b>	<b>100.0%</b>	<b>9'687</b>	<b>961'073</b>	<b>2'247</b>	<b>104</b>	<b>F</b>

Tab. 5.3.9. Climatizzazione invernale: caratterizzazione energetica delle abitazioni romane per epoca di costruzione.



Fig. 5.3.7. Indice di prestazione energetica invernale di solo riscaldamento (E<sub>pi</sub>) delle abitazioni romane per epoca di costruzione

La medesima stima energetica è stata operata anche per il consumo termico complessivo delle abitazioni, somma di quello per riscaldamento ed quello per la produzione di acqua calda sanitaria. In questo caso il fabbisogno complessivo di energia primaria sfiora gli 11'000 GWh/anno, responsabili dell'emissione di circa 2,6 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub>. In questo caso, come prevedibile, i consumi sono distribuiti più equamente nelle varie epoche. Dal punto di vista della certificazione energetica, questa volta è stato valutato il fabbisogno globale di energia primaria (EP<sub>gl</sub>) che porta a risultati leggermente migliori del caso precedente. La media globale passa dalla classe 'G' alla 'F', gli edifici anteriori agli anni '60 si posizionerebbero mediamente in classe 'G', quelli tra '60 e '90 in classe 'F', quelli tra '90 e 2001 in classe 'D' ed i più recenti in classe 'B'.

Epoca di costruz.	Distribuzione percentuale sul parco edifici	FABBISOGNI ed EMISSIONI complessive				Classe energetica di riferimento (EPI)
		[GWh/anno]	[TEP/anno]	[ktCO2/anno]	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	
< 1919	5.8%	799	79'301	185	148	G
1919-45	9.4%	1'294	128'353	300	148	G
1946-61	20.7%	2'835	281'243	657	147	G
1962-71	21.6%	2'585	256'452	599	129	G
1972-81	18.3%	1'829	181'414	424	108	F
1982-91	11.0%	1'004	99'589	233	98	F
1992-2001	5.4%	373	36'999	86	75	E
2002-2006	3.8%	219	21'711	51	63	E
2007-2009	2.0%	77	7'590	18	42	C
2010-2012	2.0%	58	5'718	13	31	B
<b>TOTALE</b>	<b>100.0%</b>	<b>11'071</b>	<b>1'098'369</b>	<b>2'567</b>	<b>119</b>	<b>F</b>

Tab. 5.3.10. Climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria: caratterizzazione energetica delle abitazioni romane per epoca di costruzione.

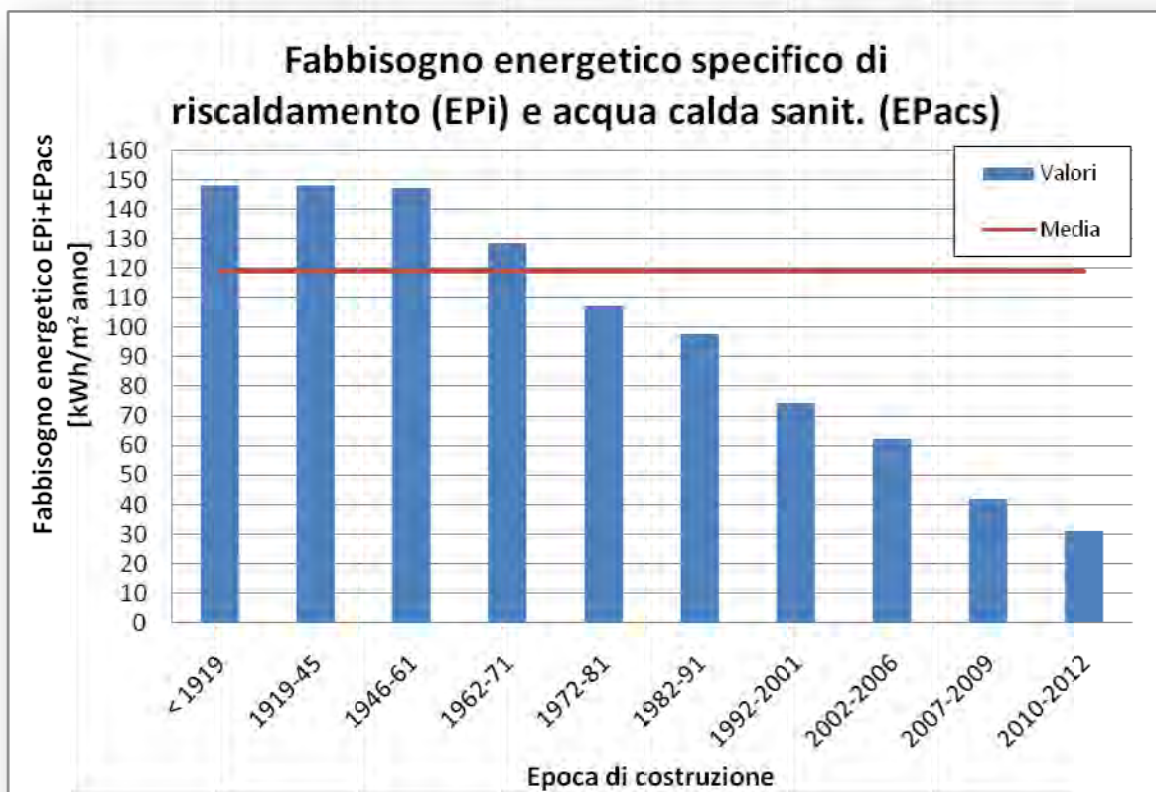


Fig. 5.3.8. Indice di prestazione energetica invernale di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria ( $EP_g$ ) delle abitazioni romane per epoca di costruzione

### 5.3.6 **Validazione dei dati risultati ottenuti**

Al fine di valutare l'affidabilità del metodo di calcolo utilizzato è stato effettuato un confronto tra le emissioni stimate e quelle effettive. I dati effettivi riguardano i consumi di gas naturale nel settore residenziale dal 1990 al 2006 provenienti da fonte ITALGAS e ENEA. Da questi dati si è ricavata la produzione equivalente di CO<sub>2</sub>, a cui è stata sommata quella prodotta da altri combustibili. Il risultato è che la stima CITERA risulta mediamente superiore ai dati reali, ma di una percentuale molto contenuta: 3% rispetto a ENEA e 2% rispetto a ITALGAS. Lo scostamento massimo risulta pari a: +10% e -7% rispetto a ENEA e +5% e -2% rispetto a ITALGAS. Il valore dell'errore si mantiene dunque limitato nell'intervallo  $\pm 10\%$  che è da ritenersi più che buono considerando la grande aleatorietà delle problematiche legate all'energia nonché l'indispensabile semplificazione con la quale la presente metodologia modella un sistema complesso come il patrimonio edilizio di una metropoli. In ogni caso i risultati ottenuti sono da ritenersi puramente indicativi dell'andamento globale. Per avere informazioni attendibili su singoli edifici è necessaria un'analisi accurata e puntuale che prenda in considerazione le condizioni del caso specifico.

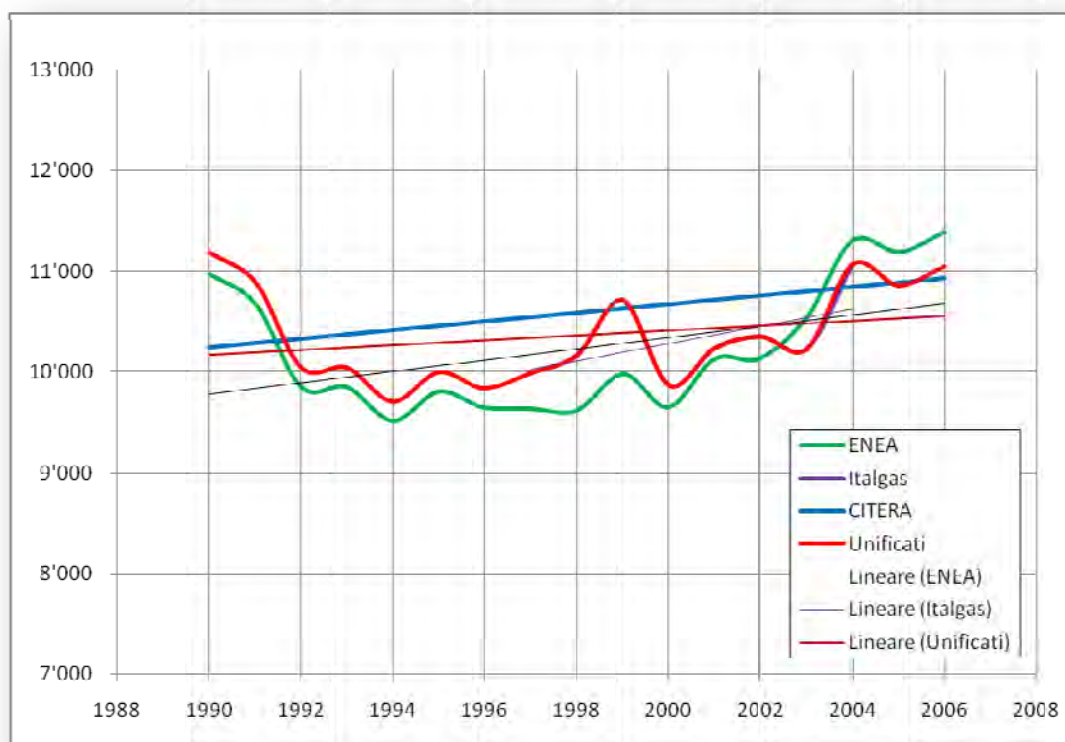


Fig.5.3.9. Confronto tra le emissioni effettive (dati ENEA e ITALGAS) e quelli stimati (CITERA)



## **5.4 Studio degli interventi di riqualificazione energetica**

Una volta costruito e validato il modello energetico dello stato attuale di cui al paragrafo 4.3, il passo successivo è quello di effettuare un'analisi parametrica per valutare l'effetto di eventuali interventi di riqualificazione che comportino un miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici considerati.

### **5.4.1 Scelta degli interventi**

Tra gli svariati interventi possibili, si è deciso di selezionarne alcuni che, all'epoca di realizzazione dello studio, sono stati considerati più immediati ed interessanti. Si fa presente che si tratta di interventi di risparmio energetico e non sono stati quindi presi in considerazione gli impianti di produzione da fonti rinnovabili. Gli interventi considerati sono i seguenti:

1. Miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro edilizio fino ai limiti di trasmittanza del Dlgs 192/05 e successive modifiche e integrazioni per il 2010. Gli interventi comprendono tre sotto interventi possibili:
  - a. Coibentazione delle pareti opache verticali
  - b. Coibentazione dei solai di copertura
  - c. Coibentazione dei pavimenti disperdenti
2. Sostituzione degli infissi come da Dlgs 192/05 e successive modifiche e integrazioni.
3. Sostituzione dei generatori di calore con caldaie a condensazione.
4. Installazione di valvole termostatiche sui radiatori.
5. Ristrutturazione della rete di distribuzione del fluido termovettore.

Si riportano i valori dei parametri di simulazione modificati per tenere in considerazione i vari interventi.

Il primo intervento comporta una riduzione delle trasmittanze termiche fino ai limiti imposti dal Dlgs 192/05 e Dlgs 311/06 per l'anno 2010.

Epoca di costruzione	Trasmittanza pareti opache verticali [W/m <sup>2</sup> K]	Trasmittanza solai di copertura [W/m <sup>2</sup> K]	Trasmittanza pavim. contro terra [W/m <sup>2</sup> K]	Trasmittanza chiusure trasparenti [W/m <sup>2</sup> K]
Tutte	0.35	0.30	0.35	2.38

Tab. 5.4.1. Trasmittanze degli elementi edilizi dopo l'intervento di efficientamento.

Il secondo intervento riguarda la sostituzione degli attuali generatori di calore con caldaie a condensazione. L'effetto è un aumento del rendimento di produzione.

Epoca di costruzione	Rendimento
Ogni epoca	92.1%

Tab. 5.4.2. Rendimento di produzione dell'impianto termico dopo l'intervento di efficientamento.

Il terzo intervento consiste nell'introduzione di valvole termostatiche e comporta un miglioramento del rendimento di regolazione.

Epoca di costruzione	Tutti gli impianti
	Rendimento
< 1919	93.0%
1919-45	93.0%
1946-61	93.0%
1962-71	93.0%
1972-81	93.0%
1982-91	93.0%
1992-2001	93.0%
2002-2006	94.0%
2006-2009	95.0%
2010-2012	96.0%
2012-2020	97.0%

Tab. 5.4.3. Rendimento di regolazione dell'impianto termico dopo l'intervento.

Il quarto intervento consiste nella coibentazione della rete di distribuzione del fluido termovettore e comporta un aumento del rendimento di distribuzione.

Epoca di costruzione	Impianti centralizzati		Impianti autonomi		Rendimento medio ponderato
	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	Rendimento	Percentuale sul parco edifici	
< 1919	95.0%	53.7%	98.0%	46.3%	96.4%
1919-45	95.0%	53.7%	98.0%	46.3%	96.4%
1946-61	95.0%	53.7%	98.0%	46.3%	96.4%
1962-71	96.0%	53.7%	98.0%	46.3%	96.9%
1972-81	97.0%	53.7%	98.5%	46.3%	97.7%
1982-91	97.0%	53.7%	98.5%	46.3%	97.7%
1992-2001	98.0%	53.7%	99.1%	46.3%	98.5%
2002-2006	98.0%	53.7%	99.1%	46.3%	98.5%
2006-2009	98.0%	53.7%	99.1%	46.3%	98.5%
2010-2012	98.0%	53.7%	99.1%	46.3%	98.5%
2012-2020	98.1%	53.7%	99.1%	46.3%	98.6%

Tab. 5.4.4. Rendimento di distribuzione dell'impianto termico dopo l'intervento.

### 5.4.2 Risultati sull'efficacia degli interventi

A questo punto si è proceduto a calcolare gli effetti energetici degli interventi mediante il modello di analisi energetico/economica. Per prima cosa le migliori sono state applicate singolarmente e separatamente per ciascuna epoca, in seguito sono state raggruppate e valutate in modo cumulativo. In questo modo è stato possibile valutare sia l'effetto di interventi singoli che di gruppi di interventi. I risultati sono riportati nelle tabelle seguenti.

Intervento 1: pareti opache verticali

Epoca di costruz.	Fabbisogn o specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogn o dopo intervento [%]	Investim . totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienz a intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno]	[M€/anno]	[ktCO2/anno]		
< 1919	95	-26.7%	376	186	18'502	15.3	43.2	24.5	0.50
1919-45	95	-27.0%	609	306	30'317	25.1	70.9	24.3	0.50
1946-61	93	-28.2%	1'342	700	69'452	57.5	162.3	23.3	0.52
1962-71	80	-28.8%	1'398	650	64'524	53.4	150.8	26.2	0.47
1972-81	69	-26.4%	1'186	422	41'854	34.6	97.8	34.3	0.36
1982-91	65	-24.6%	715	216	21'449	17.7	50.1	40.3	0.30
1992-2001	51	-21.6%	348	70	6'990	5.8	16.3	>50	0.20
2002-2006	41	-24.6%	244	47	4'668	3.9	10.9	>50	0.19
2007-2009	34	-7.7%	127	5	513	0.4	1.2	>50	0.04
<b>TOTALE</b>	<b>77</b>	<b>-26.9%</b>	<b>6'345</b>	<b>2'603</b>	<b>258'268</b>	<b>214</b>	<b>604</b>	<b>29.7</b>	<b>0.41</b>

Tab. 5.4.5. Effetto dell'intervento sulle pareti opache verticali esteso all'intero parco edilizio.

Intervento 2: coperture

Epoca di costruz.	Fabbisogn o specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogn o dopo intervento [%]	Investim . totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienz a intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno]	[M€/anno]	[ktCO2/anno]		
< 1919	113	-13.2%	98	92	9'131	7.6	21.3	13.0	0.94
1919-45	116	-10.5%	159	118	11'756	9.7	27.5	16.4	0.74
1946-61	116	-10.4%	351	257	25'515	21.1	59.6	16.6	0.73
1962-71	101	-10.1%	366	229	22'747	18.8	53.2	19.4	0.63
1972-81	86	-8.9%	310	143	14'164	11.7	33.1	26.5	0.46
1982-91	78	-8.4%	187	74	7'329	6.1	17.1	30.8	0.40
1992-2001	60	-8.4%	91	27	2'710	2.2	6.3	40.6	0.30
2002-2006	50	-8.7%	64	17	1'645	1.4	3.8	46.8	0.26
2007-2009	36	-2.5%	33	2	163	0.1	0.4	>50	0.05
<b>TOTALE</b>	<b>95</b>	<b>-9.9%</b>	<b>1'659</b>	<b>959</b>	<b>95'161</b>	<b>79</b>	<b>222</b>	<b>21.1</b>	<b>0.58</b>

Tab. 5.4.6. Effetto dell'intervento sulle coperture esteso all'intero parco edilizio.

## Intervento 3: solai pianterreno

Epoca di costruz.	Fabbisogn o specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogn o dopo intervento [%]	Investim . totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienz a intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno ]	[M€/anno]	[ktCO2/anno ]		
< 1919	118	-9.1%	98	63	6'290	5.2	14.7	18.9	0.65
1919-45	116	-10.8%	159	122	12'124	10.0	28.3	15.9	0.77
1946-61	116	-10.2%	351	252	24'998	20.7	58.4	17.0	0.72
1962-71	102	-9.8%	366	221	21'934	18.1	51.3	20.1	0.60
1972-81	86	-8.2%	310	132	13'056	10.8	30.5	28.7	0.42
1982-91	80	-6.1%	187	54	5'345	4.4	12.5	42.3	0.29
1992-2001	63	-4.3%	91	14	1'398	1.2	3.3	>50	0.15
2002-2006	52	-4.9%	64	9	933	0.8	2.2	>50	0.15
2007-2009	36	-2.2%	33	1	148	0.1	0.3	>50	0.04
<b>TOTALE</b>	<b>96</b>	<b>-8.9%</b>	<b>1'659</b>	<b>869</b>	<b>86'226</b>	<b>71</b>	<b>202</b>	<b>23.2</b>	<b>0.52</b>

Tab. 5.4.7. Effetto dell'intervento sui solai contro terra esteso all'intero parco edilizio.

## Intervento 4: finestre

Epoca di costruz.	Fabbisogn o specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogn o dopo intervento [%]	Investim . totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienz a intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno ]	[M€/anno]	[ktCO2/anno ]		
< 1919	101	-21.9%	323	153	15'194	12.6	35.5	25.7	0.47
1919-45	101	-22.2%	524	251	24'897	20.6	58.2	25.4	0.48
1946-61	101	-22.0%	1'154	545	54'034	44.7	126.3	25.8	0.47
1962-71	90	-19.8%	1'203	449	44'497	36.8	104.0	32.7	0.37
1972-81	74	-21.8%	1'020	349	34'636	28.7	81.0	35.6	0.34
1982-91	66	-23.5%	615	206	20'480	16.9	47.9	36.3	0.34
1992-2001	53	-18.4%	299	60	5'961	4.9	13.9	>50	0.20
2002-2006	50	-8.0%	210	15	1'523	1.3	3.6	>50	0.07
2007-2009	33	-11.4%	109	8	754	0.6	1.8	>50	0.07
<b>TOTALE</b>	<b>84</b>	<b>-21.1%</b>	<b>5'458</b>	<b>2'036</b>	<b>201'977</b>	<b>167</b>	<b>472</b>	<b>32.7</b>	<b>0.37</b>

Tab. 5.4.8. Effetto dell'intervento sugli infissi esteso all'intero parco edilizio.

## Intervento 5: generatori di calore

Epoca di costruz.	Fabbisogno specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogno dopo intervento [%]	Investim. totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienza intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno]	[M€/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]		
< 1919	104	-20.0%	115	140	13'900	11.5	32.5	10.0	1.21
1919-45	103	-20.9%	187	236	23'425	19.4	54.8	9.6	1.26
1946-61	104	-19.7%	409	489	48'500	40.1	113.4	10.2	1.20
1962-71	94	-16.5%	373	372	36'953	30.6	86.4	12.2	1.00
1972-81	82	-12.9%	264	207	20'533	17.0	48.0	15.5	0.78
1982-91	75	-12.9%	145	114	11'272	9.3	26.3	15.5	0.78
1992-2001	57	-12.4%	54	41	4'028	3.3	9.4	16.1	0.75
2002-2006	49	-9.7%	32	19	1'836	1.5	4.3	20.8	0.59
2007-2009	34	-7.2%	11	5	476	0.4	1.1	28.0	0.43
<b>TOTALE</b>	<b>88</b>	<b>-16.8%</b>	<b>1'589</b>	<b>1'622</b>	<b>160'923</b>	<b>133</b>	<b>376</b>	<b>11.9</b>	<b>1.02</b>

Tab. 5.4.9. Effetto dell'intervento sui generatori di calore esteso all'intero parco edilizio.

## Intervento 6: valvole termostatiche

Epoca di costruz.	Fabbisogno specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogno dopo intervento [%]	Investim. totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienza intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno]	[M€/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]		
< 1919	118	-9.0%	13	63	6'244	5.2	14.6	2.6	4.74
1919-45	118	-9.0%	22	102	10'106	8.4	23.6	2.6	4.73
1946-61	117	-9.0%	47	223	22'145	18.3	51.8	2.6	4.71
1962-71	104	-7.5%	49	170	16'841	13.9	39.4	3.5	3.44
1972-81	90	-4.6%	42	74	7'331	6.1	17.1	6.9	1.76
1982-91	82	-4.6%	25	41	4'024	3.3	9.4	7.6	1.61
1992-2001	63	-3.5%	12	11	1'121	0.9	2.6	13.3	0.92
2002-2006	53	-4.0%	9	8	760	0.6	1.8	13.7	0.89
2007-2009	36	-2.8%	4	2	188	0.2	0.4	28.9	0.42
<b>TOTALE</b>	<b>98</b>	<b>-7.2%</b>	<b>224</b>	<b>693</b>	<b>68'760</b>	<b>57</b>	<b>161</b>	<b>3.9</b>	<b>3.09</b>

Tab. 5.4.10. Effetto dell'introduzione di valvole termostatiche per l'intero parco edilizio.

Intervento 7: rete di distribuzione

Epoca di costruz.	Fabbisogno specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogno dopo intervento [%]	Investim. totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienza intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno]	[M€/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]		
< 1919	124	-4.3%	60	30	2'986	2.5	7.0	24.4	0.50
1919-45	124	-4.3%	98	49	4'833	4.0	11.3	24.5	0.50
1946-61	123	-4.3%	215	107	10'589	8.8	24.8	24.6	0.50
1962-71	108	-4.4%	225	99	9'773	8.1	22.8	27.8	0.44
1972-81	91	-3.8%	190	60	5'987	5.0	14.0	38.5	0.32
1982-91	84	-1.9%	115	17	1'643	1.4	3.8	>50	0.14
1992-2001	65	-1.1%	56	4	368	0.3	0.9	>50	0.07
2002-2006	55	0.0%	39	0	9	0.0	0.0	>50	0.00
2007-2009	37	0.0%	20	0	3	0.0	0.0	>50	0.00
<b>TOTALE</b>	<b>102</b>	<b>-3.8%</b>	<b>1'019</b>	<b>365</b>	<b>36'190</b>	<b>30</b>	<b>85</b>	<b>34.0</b>	<b>0.36</b>

Tab. 5.4.11. Effetto dell'intervento sulle rete di distribuzione esteso all'intero parco edilizio.

Intervento cumulativo A: tutto involucro

Epoca di costruz.	Fabbisogno specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogno dopo intervento [%]	Investim. totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienza intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno]	[M€/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]		
< 1919	38	-70.8%	806	495	49'117	40.6	114.8	19.8	0.61
1919-45	38	-70.4%	1'307	797	79'094	65.4	184.9	20.0	0.61
1946-61	38	-70.7%	2'877	1'754	174'000	144.0	406.7	20.0	0.61
1962-71	36	-68.5%	2'999	1'549	153'702	127.2	359.3	23.6	0.52
1972-81	33	-65.3%	2'544	1'045	103'710	85.8	242.4	29.6	0.41
1982-91	32	-62.7%	1'534	550	54'602	45.2	127.6	33.9	0.36
1992-2001	31	-52.7%	747	172	17'058	14.1	39.9	>50	0.23
2002-2006	29	-46.2%	523	88	8'770	7.3	20.5	>50	0.17
2007-2009	28	-23.8%	272	16	1'578	1.3	3.7	>50	0.06
<b>TOTALE</b>	<b>35</b>	<b>-66.7%</b>	<b>13'609</b>	<b>6'467</b>	<b>641'632</b>	<b>531</b>	<b>1'500</b>	<b>25.6</b>	<b>0.48</b>

Tab. 5.4.12. Effetto dell'intervento cumulativo su tutto l'involucro esteso all'intero parco edilizio.

## Intervento cumulativo B: tutto impianto

Epoca di costruz.	Fabbisogno specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogno dopo intervento [%]	Investim. totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienza intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno]	[M€/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]		
< 1919	90	-30.4%	179	212	21'066	17.4	49.2	10.3	1.18
1919-45	89	-31.1%	291	352	34'904	28.9	81.6	10.1	1.21
1946-61	90	-30.1%	638	746	74'018	61.2	173.0	10.4	1.17
1962-71	83	-26.1%	615	590	58'571	48.5	136.9	12.7	0.96
1972-81	75	-20.1%	471	321	31'887	26.4	74.5	17.9	0.68
1982-91	70	-18.5%	271	163	16'141	13.4	37.7	20.3	0.60
1992-2001	55	-16.4%	116	54	5'321	4.4	12.4	26.3	0.46
2002-2006	47	-13.3%	75	25	2'530	2.1	5.9	36.0	0.34
2007-2009	33	-9.8%	34	7	653	0.5	1.5	>50	0.19
<b>TOTALE</b>	<b>79</b>	<b>-25.6%</b>	<b>2'690</b>	<b>2'470</b>	<b>245'090</b>	<b>203</b>	<b>573</b>	<b>13.3</b>	<b>0.92</b>

Tab. 5.4.13. Effetto dell'intervento cumulativo su tutto l'impianto esteso all'intero parco edilizio.

## Intervento cumulativo C: tutto involucro + tutto impianto

Epoca di costruz.	Fabbisogno specifico dopo l'intervento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Variazione fabbisogno dopo intervento [%]	Investim. totale [M€]	Risparmio complessivo annuale				Tempo di ritorno investim. [anni]	Indice di convenienza intervento [kWh/€]
				[GWh/anno]	[TEP/anno]	[M€/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]		
< 1919	26	-79.7%	902	557	55'271	45.7	129.2	19.7	0.62
1919-45	26	-79.6%	1'461	901	89'417	74.0	209.0	19.8	0.62
1946-61	26	-79.5%	3'220	1'972	195'682	161.9	457.4	19.9	0.61
1962-71	26	-76.7%	3'330	1'735	172'154	142.5	402.4	23.4	0.52
1972-81	26	-72.3%	2'796	1'157	114'764	95.0	268.3	29.4	0.41
1982-91	26	-69.6%	1'675	611	60'629	50.2	141.7	33.4	0.36
1992-2001	26	-60.5%	803	197	19'576	16.2	45.8	49.6	0.25
2002-2006	26	-53.3%	559	102	10'132	8.4	23.7	>50	0.18
2007-2009	25	-31.3%	287	21	2'076	1.7	4.9	>50	0.07
<b>TOTALE</b>	<b>26</b>	<b>-66.7%</b>	<b>15'033</b>	<b>7'254</b>	<b>719'701</b>	<b>596</b>	<b>1'682</b>	<b>25.2</b>	<b>0.48</b>

Tab. 5.4.14. Effetto dell'intervento cumulativo su involucro e impianti esteso all'intero parco edilizio.



Si riportano in seguito i diagrammi riepilogativi sull'efficacia dei diversi interventi.

<b>Intervento</b>	<b>Indice di convenienza</b> [kWh risparmiato/€ speso]	<b>Tempo di ritorno</b> [anni]
<b>Valvole termostatiche</b>	3.15	4
<b>Generatori di calore</b>	1.02	12
<b>TUTTO IMPIANTO</b>	0.93	13
<b>Coperture</b>	0.59	21
<b>Solai pianterreno</b>	0.53	23
<b>TUTTO INVOLUCRO + TUTTO IMPIANTO</b>	0.49	25
<b>TUTTO INVOLUCRO</b>	0.48	25
<b>Pareti opache verticali</b>	0.42	29
<b>Finestre</b>	0.38	32
<b>Rete di distribuzione</b>	0.37	33

Tab. 5.4.15. Classifica di convenienza economico-energetica dei diversi interventi.

I risultati mostrano che, in termini di tempo di ritorno, l'investimento di gran lunga più vantaggioso è l'introduzione di valvole termostatiche (tempo di ritorno circa 4 anni) che presentano un basso costo di acquisto, stimabile in circa 0,8 €/m<sup>3</sup>, e una difficoltà di installazione contenuta. I benefici possono essere rilevanti soprattutto negli appartamenti con riscaldamento condominiale o negli edifici pubblici dove, nella mezza stagione, il calore fornito dai radiatori è in eccesso rispetto ai reali fabbisogni. Al secondo posto si posiziona l'intervento di sostituzione dei generatori di calore (tempo di ritorno circa 12 anni). Anche in questo caso l'intervento non è particolarmente invasivo ed è sempre possibile anche negli edifici storici. L'investimento può essere stimato mediamente in 70 €/kW ma varia di molto in base alla taglia del generatore. Gli interventi sull'involucro sono tutti caratterizzati da tempi di ritorno più elevati, dai 20 ai 25 anni, ad esclusione degli infissi il cui investimento rientra dopo più di 30 anni. Ciò è

dovuto ai maggiori costi degli interventi all'involucro rispetto a quelli sull'impianto. In particolare le finestre, sebbene siano un'efficace misura contro le dispersioni termiche, risultano molto costose (circa 400 €/m<sup>2</sup>) e quindi poco convenienti. L'intervento meno efficace è in assoluto la ristrutturazione della rete di distribuzione che comporta lavori costosi ed una resa non altrettanto buona.

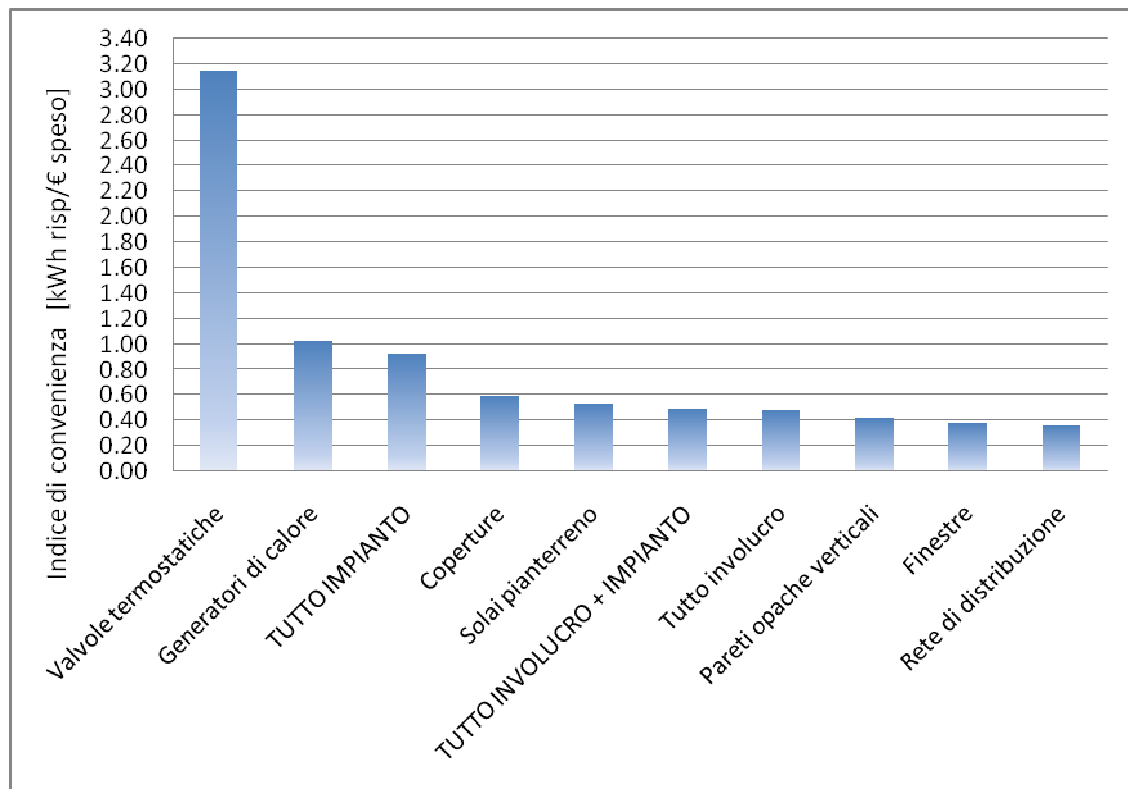


Fig. 5.4.1. Tempo di ritorno economico degli investimenti di riqualificazione energetica.

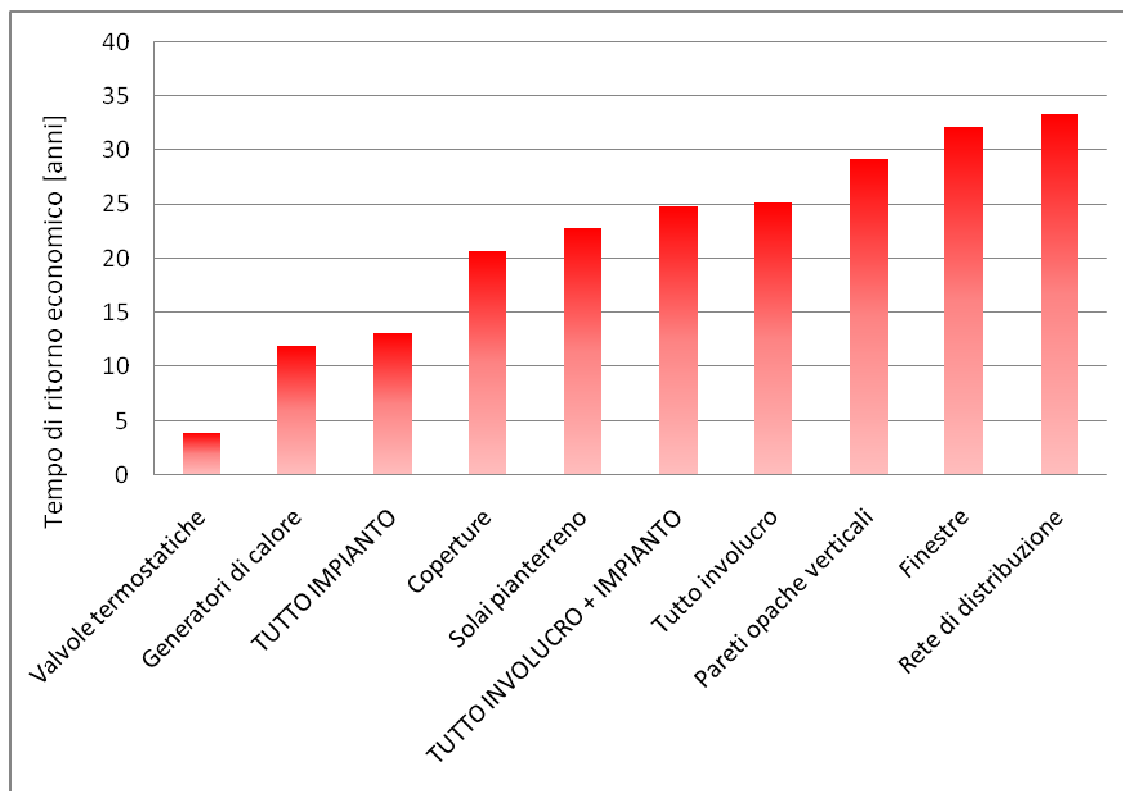


Fig. 5.4.2. Tempo di ritorno economico degli investimenti di riqualificazione energetica.

Oltre alle considerazioni sulla convenienza economica vanno aggiunte quelle riguardanti l'effettiva incidenza dei singoli interventi sul fabbisogno globale. In particolare si fa presente che le valvole termostatiche, pur avendo un'ottima resa, possono influire non più del 7% sulla riduzione del fabbisogno energetico delle abitazioni romane. I generatori di calore si attestano attorno al 16%, mentre sono proprio gli interventi all'involucro quelli che hanno le maggiori potenzialità: la coibentazione può condurre ad un risparmio superiore al 40% e gli infissi intorno al 20%. Un intervento completo, sia all'involucro che agli impianti, può ridurre mediamente i consumi energetici di oltre il 70%. Tale considerazione appare evidente dai seguenti grafici.

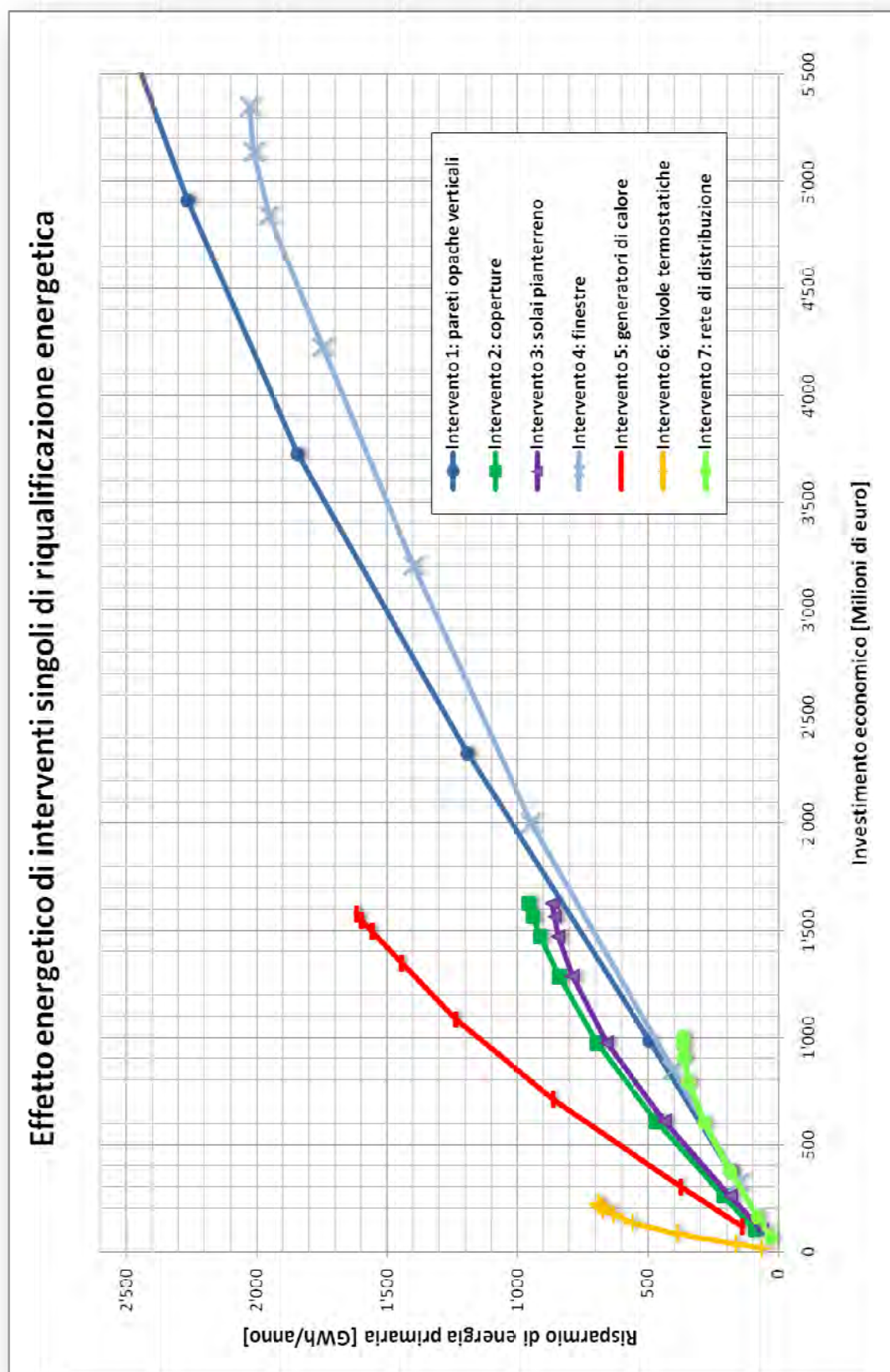


Fig. 5.4.3. Analisi costi/benefici degli interventi singoli di riqualificazione energetica.

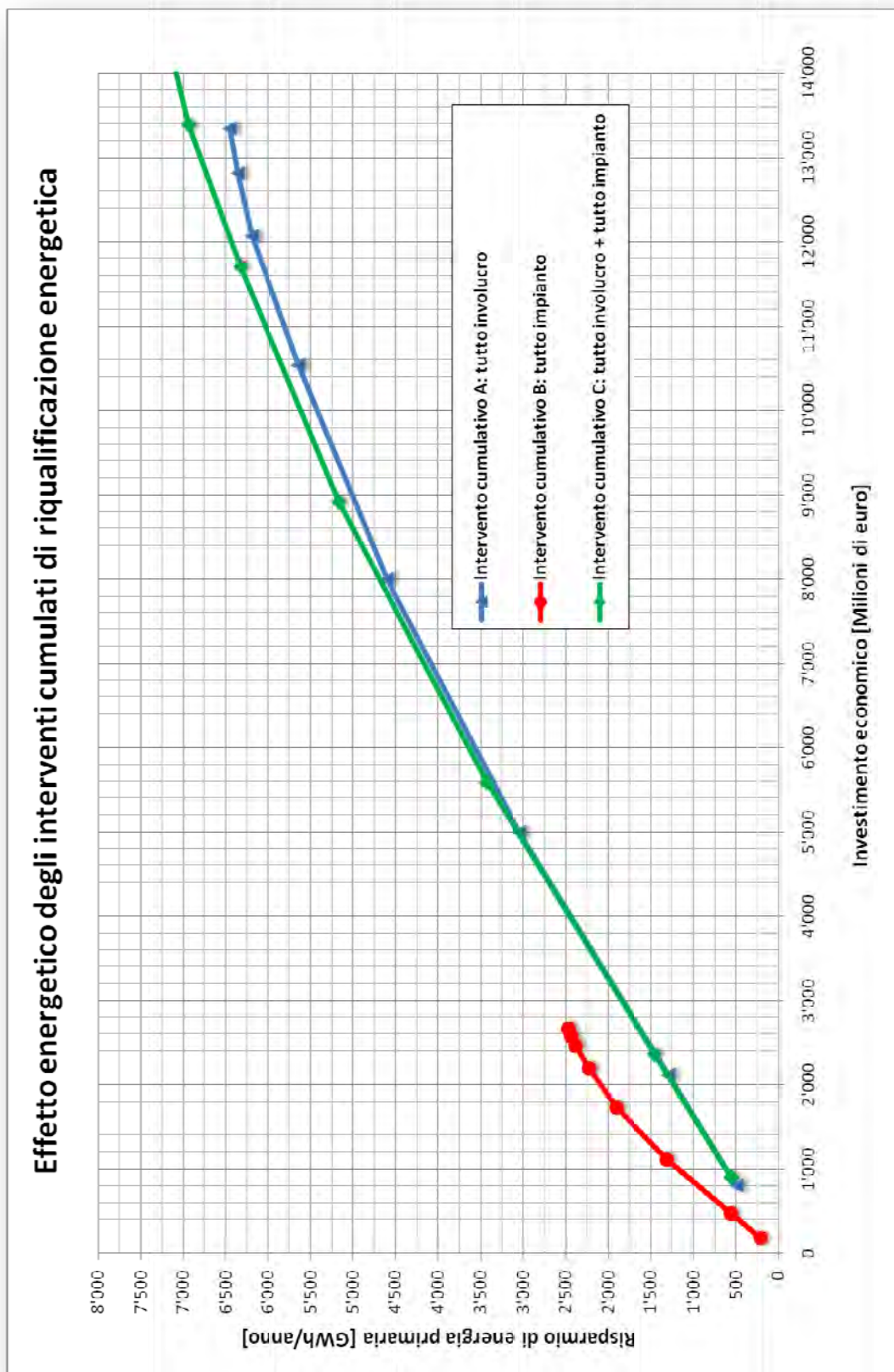


Fig. 5.4.4. Analisi costi/benefici degli interventi cumulati di riqualificazione energetica.

Si può concludere che in un'ottica di pianificazione energetica è utile privilegiare gli interventi più efficaci ed economicamente sostenibili. Per gli edifici storici o comunque scarsamente modificabili sarebbe opportuno privilegiare azioni mirate agli impianti, mentre per gli altri si potrebbero prevedere interventi combinati involucro-impianto.

Affianco a ciò sarebbe di grande utilità incentivare l'acquisto e l'installazione delle valvole termostatiche anche indipendentemente da altri lavori di riqualificazione energetica, in modo analogo a quanto sta avvenendo per gli elettrodomestici di classe 'A' e per le lampade a basso consumo.

## 5.5 Studio degli scenari di evoluzione

Il modello finora descritto permette l'analisi del fabbisogno energetico attuale e consente valutazioni sull'efficacia dei diversi interventi di riqualificazione. Per ottenere invece l'obiettivo di prevedere le emissioni di CO<sub>2</sub> al 2020 e confrontare i possibili scenari futuri è necessario implementare un algoritmo evolutivo in grado di valutare i consumi negli anni a venire.

Tale algoritmo si basa su una serie di tassi di ristrutturazione per i vari componenti del sistema edificio/impianto e per i diversi anni. In base a tali valori il software ricalcola, anno per anno, la prestazione energetica dell'intera città modificando di volta in volta i parametri di simulazione. Il risultato è un andamento proiettato fino al 2020.

### 5.5.1 Impostazione degli scenari

#### SCENARIO "EVOLUZIONE TENDENZIALE" (AS USUAL)

Il primo scenario analizzato è quello di evoluzione naturale del sistema secondo l'attuale andamento. Per questo scenario si sono determinati i tassi di ristrutturazione mediante un'analisi bibliografica dei dati statistici sul settore edilizio nonché delle pubblicazioni sui risultati delle detrazioni fiscali del 36% e del 55%.

In questo scenario sono stati quindi adottati i tassi di ristrutturazione annuale riportati nelle tabelle 5.5.1 e 5.5.2.

Epoca di costruzione:	Epoca di ristrutturazione :					
				2007	2009	
	Infissi	Pareti opache	Tutto involucro	Gen. Calore	Valvole term.	Rete distr.
< 1919	1.33%	0.57%	0.81%	1.90%	0.48%	0.48%
1919-45	1.33%	0.57%	0.81%	1.90%	0.48%	0.48%
1946-61	1.33%	0.57%	0.81%	1.90%	0.48%	0.48%
1962-71	1.33%	0.57%	0.81%	1.90%	0.48%	0.48%
1972-81	1.33%	0.57%	0.81%	1.90%	0.48%	0.48%
1982-91	1.00%	0.40%	0.59%	1.40%	0.48%	0.30%
1992-2001	0.70%	0.30%	0.43%	1.00%	0.48%	0.10%
2002-2006	0.20%	0.10%	0.13%	0.40%	0.48%	0.00%
2007-2009	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%	0.20%	0.00%
2010-2012	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2013-2020	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tab. 5.5.1. Valori del tasso di ristrutturazione annuale nello scenario "AS USUAL" per gli edifici delle diverse epoche nel periodo 2007-2009.

Epoca di costruzione:	Epoca di ristrutturazione :					
				2010	2020	
	Infissi	Pareti opache	Tutto involucro	Gen. Calore	Valvole term.	Rete distr.
< 1919	1.47%	0.63%	0.89%	2.10%	0.53%	0.53%
1919-45	1.47%	0.63%	0.89%	2.10%	0.53%	0.53%
1946-61	1.47%	0.63%	0.89%	2.10%	0.53%	0.53%
1962-71	1.47%	0.63%	0.89%	2.10%	0.53%	0.53%
1972-81	1.47%	0.63%	0.89%	2.10%	0.53%	0.53%
1982-91	1.10%	0.63%	0.78%	2.10%	0.53%	0.53%
1992-2001	1.10%	0.40%	0.62%	1.80%	0.53%	0.30%
2002-2006	0.60%	0.30%	0.39%	1.30%	0.53%	0.10%
2007-2009	0.30%	0.15%	0.20%	1.00%	0.53%	0.00%
2010-2012	0.20%	0.10%	0.13%	0.70%	0.53%	0.00%
2013-2020	0.10%	0.05%	0.07%	0.40%	0.53%	0.00%

Tab. 5.5.2. Valori del tasso di ristrutturazione annuale nello scenario "AS USUAL" per gli edifici delle diverse epoche nel periodo 2010-2020.

Tale scenario è quindi rappresentativo dell'attuale tendenza ma anche degli effetti delle politiche di incentivazione alla riqualificazione energetica operate in questi anni.



SCENARIO “NESSUN INTERVENTO”

Il secondo scenario analizzato è di tipo peggiorativo e rappresenta l'evoluzione nel caso in cui si dovessero azzerare i tassi di ristrutturazione. Si tratta quindi di un'eventualità remota, ma esso ci permette di evidenziare l'evoluzione peggiore che il sistema può assumere.

In questo scenario i tassi di ristrutturazione annuale sono stati posti tutti a zero.

SCENARIO “INTERVENTI AGGIUNTIVI”

L'ultimo scenario rappresenta l'obiettivo da raggiungere. Esso è stato calcolato introducendo un *mix* ben bilanciato di interventi aggiuntivi oltre a quelli già presenti nello scenario di evoluzione tendenziale. Il gruppo di interventi aggiuntivi è stato selezionato a partire dalle valutazioni sulla convenienza economico/energetica già riportate nel paragrafo precedente al fine di raggiungere l'obiettivo di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> del 20% al 2020.

In questo scenario sono stati quindi adottati i tassi di ristrutturazione annuale riportati in tabella 5.5.3.

Epoca di costruzione:	Epoca di ristrutturazione :			2010	2020
	Infissi	Pareti opache	Tutto involucro	Gen. Calore	Valvole term. Rete distr.
< 1919	1.50%	1.80%	1.71%	5.00%	8.00% 0.60%
1919-45	1.50%	1.80%	1.71%	5.00%	8.00% 0.60%
1946-61	1.50%	2.10%	1.91%	5.00%	8.00% 0.60%
1962-71	1.50%	1.80%	1.71%	5.00%	8.00% 0.60%
1972-81	1.50%	1.80%	1.71%	5.00%	8.00% 0.60%
1982-91	1.50%	1.30%	1.36%	4.00%	8.00% 0.60%
1992-2001	1.20%	0.00%	0.38%	2.00%	8.00% 0.00%
2002-2006	0.00%	0.00%	0.00%	1.50%	3.60% 0.00%
2007-2009	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.80% 0.00%
2010-2012	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00% 0.00%
2013-2020	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00% 0.00%

Tab. 5.5.3. Valori del tasso di ristrutturazione annuale nello scenario “INTERVENTI AGGIUNTIVI” per gli edifici delle diverse epoche nel periodo 2010-2020.

Dalla tabella si vede chiaramente che sono stati privilegiati gli interventi maggiormente efficienti, come l'introduzione di valvole termostatiche e la sostituzione degli impianti. La coibentazione dell'involucro e la sostituzione dei serramenti è stata invece di poco incrementata rispetto allo scenario "as usual" e soprattutto per gli immobili più datati.

Un riassunto dei tre scenari può essere consultato nella tabella seguente, dove è riportata la percentuale cumulata dei singoli interventi al 2020.

Scenari	Percentuale di intervento sugli edifici al 2020				
	Infissi	Pareti opache e solai disperdenti	Generatori di calore	Valvole termostatiche	Rete di distribuzione
Nessun intervento	0%	0%	0%	0%	0%
As usual	17%	7%	25%	7%	6%
Interventi aggiuntivi	1%	10%	25%	73%	0%
<b>TOTALE</b>	<b>18%</b>	<b>18%</b>	<b>51%</b>	<b>80%</b>	<b>7%</b>

Tab. 5.5.4. Valori complessivi delle percentuali di intervento nei diversi scenari e per i diversi componenti del sistema edificio.

### 5.5.2 Analisi dei risultati

Nelle tabelle seguenti sono riportati i risultati del calcolo. Essi mostrano l'andamento negli anni degli indicatori di consumo energetico e di emissione di CO<sub>2</sub> nonché la relativa classificazione energetica media per l'intero patrimonio edilizio residenziale di Roma in base ai tre scenari analizzati.

Anno	Fabbisogni energetici di RISCALDAMENTO per lo scenario NESSUN INTERVENTO				Classe Epgl
	[GWh/anno]	[TEP/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	
1990	8'964	889'342	2'079	113	<b>G</b>
2001	9'378	930'430	2'175	109	<b>G</b>
2006	9'570	949'428	2'219	107	<b>G</b>
2009	9'637	956'069	2'235	106	<b>G</b>
2012	9'687	961'073	2'247	104	<b>G</b>
<b>2020</b>	<b>9'816</b>	<b>973'827</b>	<b>2'276</b>	<b>100</b>	<b>F</b>

Tab. 5.5.5. Evoluzione negli anni dei fabbisogni energetici di solo riscaldamento per lo scenario "NESSUN INTERVENTO".

Anno	Fabbisogni energetici di RISCALDAMENTO per lo scenario EVOLUZIONE TENDENZIALE				Classe Epgl
	[GWh/anno]	[TEP/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	
1990	8'964	889'342	2'079	113	<b>G</b>
2001	9'378	930'430	2'175	109	<b>G</b>
2006	9'570	949'428	2'219	107	<b>G</b>
2009	9'368	929'399	2'172	103	<b>G</b>
2012	9'122	905'033	2'116	98	<b>F</b>
<b>2020</b>	<b>8'498</b>	<b>843'128</b>	<b>1'971</b>	<b>87</b>	<b>F</b>

Tab. 5.5.6. Evoluzione negli anni dei fabbisogni energetici di solo riscaldamento per lo scenario "EVOLUZIONE TENDENZIALE".

Anno	Fabbisogni energetici di RISCALDAMENTO per lo scenario INTERVENTI AGGIUNTIVI				Classe Epgl
	[GWh/anno]	[TEP/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	
1990	8'964	889'342	2'079	113	<b>G</b>
2001	9'378	930'430	2'175	109	<b>G</b>
2006	9'570	949'428	2'219	107	<b>G</b>
2009	9'368	929'399	2'172	103	<b>G</b>
2012	8'680	861'136	2'013	94	<b>F</b>
<b>2020</b>	<b>7'123</b>	<b>706'669</b>	<b>1'652</b>	<b>73</b>	<b>F</b>

Tab. 5.5.7. Evoluzione negli anni dei fabbisogni energetici di solo riscaldamento per lo scenario "INTERVENTI AGGIUNTIVI".

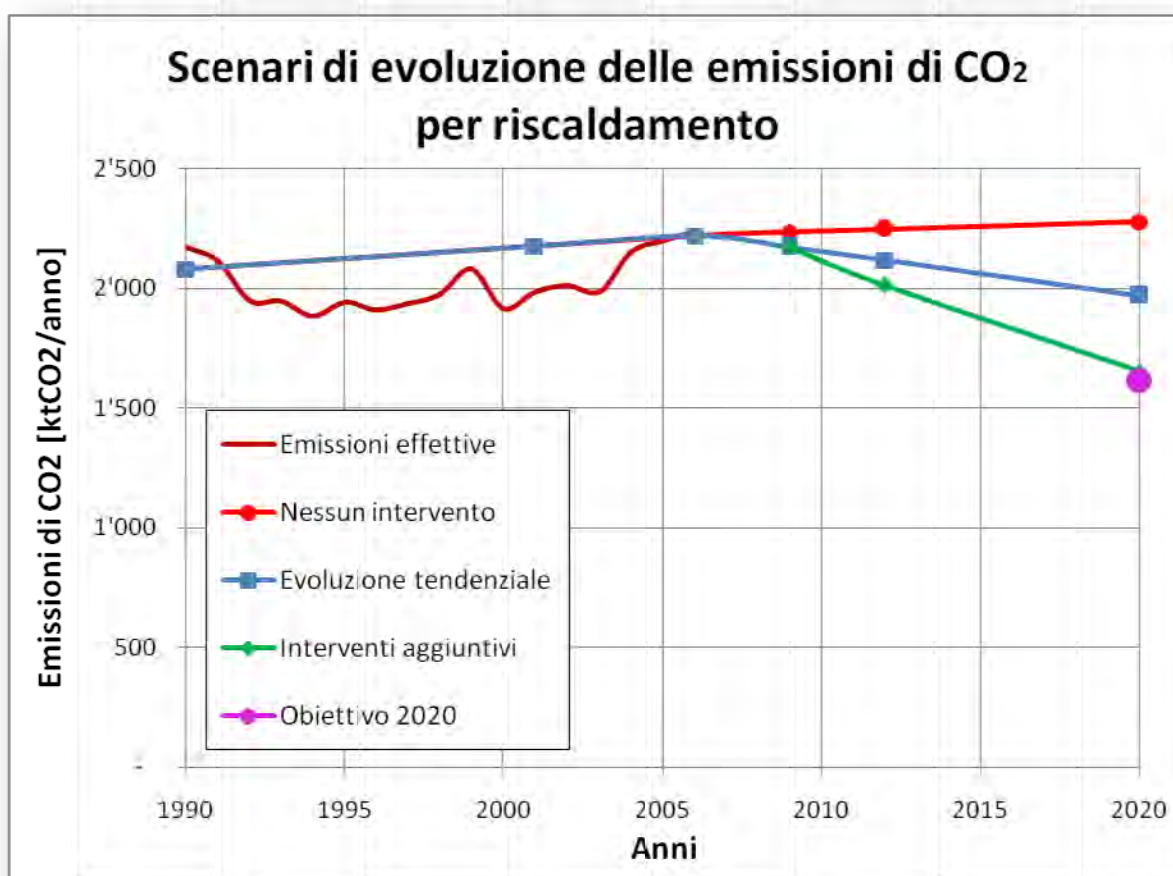


Fig. 5.5.1. Confronto dell'evoluzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> dovuta alla climatizzazione del parco edilizio residenziale romano nei diversi scenari analizzati.

Anno	Fabbisogni energetici di RISCALDAMENTO + ACS per lo scenario NESSUN INTERVENTO				Classe Epgl
	[GWh/anno]	[TEP/anno]	[ktCO2/anno]	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	
1990	10'245	1'016'391	2'376	129	<b>F</b>
2001	10'718	1'063'349	2'486	125	<b>F</b>
2006	10'937	1'085'060	2'536	123	<b>F</b>
2009	11'013	1'092'650	2'554	121	<b>F</b>
2012	11'071	1'098'369	2'567	119	<b>F</b>
<b>2020</b>	<b>11'218</b>	<b>1'112'945</b>	<b>2'602</b>	<b>115</b>	<b>F</b>

Tab. 5.5.8. Evoluzione negli anni dei fabbisogni energetici di riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria per lo scenario "NESSUN INTERVENTO".

Anno	Fabbisogni energetici di RISCALDAMENTO + ACS per lo scenario EVOLUZIONE TENDENZIALE				Classe Epgl
	[GWh/anno]	[TEP/anno]	[ktCO2/anno]	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	
1990	10'245	1'016'391	2'376	129	<b>F</b>
2001	10'718	1'063'349	2'486	125	<b>F</b>
2006	10'937	1'085'060	2'536	123	<b>F</b>
2009	10'706	1'062'170	2'483	118	<b>F</b>
2012	10'426	1'034'323	2'418	112	<b>F</b>
<b>2020</b>	<b>9'712</b>	<b>963'574</b>	<b>2'252</b>	<b>99</b>	<b>F</b>

Tab. 5.5.9. Evoluzione negli anni dei fabbisogni energetici di riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria per lo scenario "EVOLUZIONE TENDENZIALE".

Anno	Fabbisogni energetici di RISCALDAMENTO + ACS per lo scenario INTERVENTI AGGIUNTIVI				Classe Epgl
	[GWh/anno]	[TEP/anno]	[ktCO <sub>2</sub> /anno]	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	
1990	10'245	1'016'391	2'376	129	<b>F</b>
2001	10'718	1'063'349	2'486	125	<b>F</b>
2006	10'937	1'085'060	2'536	123	<b>F</b>
2009	10'706	1'062'170	2'483	118	<b>F</b>
2012	9'920	984'155	2'300	107	<b>F</b>
<b>2020</b>	<b>8'140</b>	<b>807'621</b>	<b>1'888</b>	<b>83</b>	<b>E</b>

Tab. 5.5.10. Evoluzione negli anni dei fabbisogni energetici di riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria per lo scenario "INTERVENTI AGGIUNTIVI".

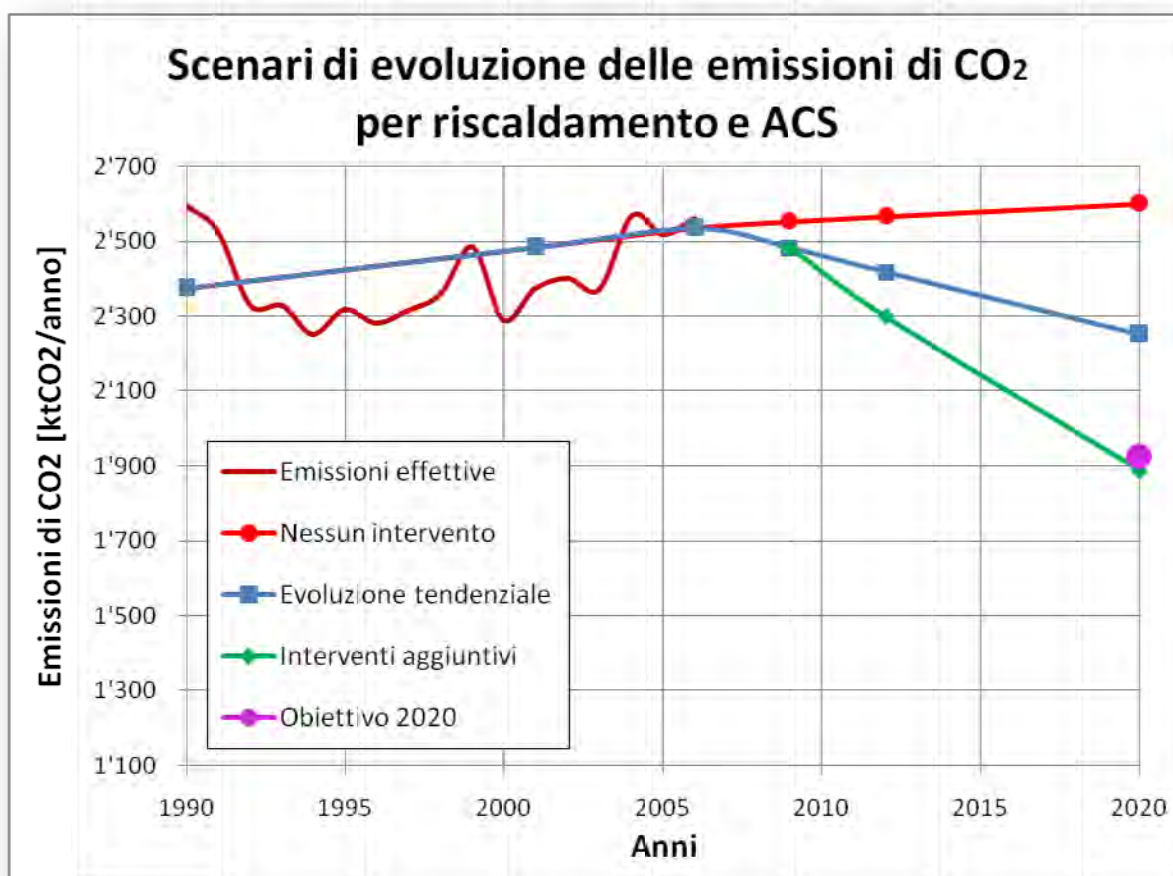


Fig. 5.5.2. Confronto dell'evoluzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> dovuta alla climatizzazione e alla produzione di acqua calda sanitaria del parco edilizio residenziale romano nei diversi scenari analizzati.

I grafici riassuntivi di Fig. 5.5.1 e Fig. 5.5.2 mostrano che l'obiettivo di riduzione delle emissioni del 20% al 2020 non è impossibile da raggiungere. Le attuali normative sull'efficienza energetica permettono già di coprire circa una metà del risparmio che è necessario ottenere rispetto all'evoluzione "senza interventi". L'impegno sottoscritto dalla città di Roma necessita di uno sforzo aggiuntivo che nella sostanza è quantificabile al 2020 come segue (tab. 5.5.4):

- **+ 10% di coibentazione dei componenti dell'involucro (totale = 18%);**
- **+ 25% di sostituzione dei generatori di calore (totale = 51%);**
- **+ 73% di installazione di valvole termostatiche (totale = 80%);**

Si vede che la spinta maggiore dovrebbe essere data agli interventi di più rapida e semplice attuazione, come l'introduzione di valvole termostatiche e la sostituzione dei generatori di calore.

L'importanza della scelta degli interventi aggiuntivi da incentivare risulta evidente da dalla tabella seguente. Gli interventi aggiuntivi hanno un tempo di ritorno medio di 15 anni contro i 20 anni dell'attuale tendenza. Ciò significa che è possibile migliorare del 33% l'efficienza energetico/economica degli interventi di efficientamento, con un beneficio evidente per le amministrazioni che elargiscono incentivazioni sul settore.

Scenari	Entità della spesa per gli interventi			Tempo di ritorno [anni]
	Totale [M€]	Al mq [€/m <sup>2</sup> ]	Pro-capite [€/pers]	
Nessun intervento	-	-	-	-
As usual	2'114	22	775	20
Interventi aggiuntivi	1'738	18	638	15
<b>TOTALE</b>	<b>3'852</b>	<b>39</b>	<b>1'413</b>	<b>17</b>

Tab. 5.5.11. Ammontare complessivo degli investimenti necessari a finanziare gli interventi di riqualificazione energetica nei diversi scenari. Calcolo del tempo di rientro dell'investimento.

La spesa necessaria per l'esecuzione degli interventi aggiuntivi ammonta a circa 1,7 miliardi di euro. Un cifra che appare immensa ma, se confrontata alla superficie delle abitazioni o al numero di residenti, conduce a risultati piuttosto accettabili pari a circa 18 €/m<sup>2</sup> oppure 638 €/persona.



## **Conclusioni**

## Conclusioni

Il gruppo di ricerca cui appartengo è impegnato da lungo tempo in studi nel campo dell'efficienza energetica dei sistemi edificio/impianto. In questo campo le problematiche di calcolo sono spesso complesse ed interessano al tempo stesso aspetti termici, elettrici, illuminotecnici, economici, di comfort, ecc. E' dunque imprescindibile l'utilizzo di supporti informatici in grado di svolgere i calcoli rapidamente e accuratamente. Su questo punto si è da sempre ravvisata la mancanza di un software in grado di soddisfare adeguatamente le molteplici esigenze richieste, specialmente nel caso in cui debbano essere valutate soluzioni innovative che non trovano già larga applicazione nella pratica. E' stato quindi sviluppato un nuovo software personalizzato, chiamato Archi-Energy, ritagliato sulle esigenze specifiche del mondo della ricerca e con caratteristiche *open-source* che permettono un potenziale e continuo contributo dall'intera comunità scientifica.

Le applicazioni del software possono essere le più svariate. Il primo studio di grande rilevanza eseguito con una versione iniziale di Archi-Energy ha riguardato la valutazione energetica dei fabbisogni energetici dell'edilizia residenziale della città di Roma. Questo studio è stato inserito nel Piano d'Azione di Roma per l'Efficienza Energetica (SEAP - *Sustainable Energy Action Plan*), realizzato con il patrocinio dell'esimio Prof. Jeremy Rifkin e approvato dalla giunta comunale di Roma Capitale il 19 Ottobre 2011.

Grazie ad un'elaborazione dei dati aggregati disponibili, è stato possibile effettuare una modellazione energetica dell'intera città di Roma. Ciò ha permesso di individuare i "punti deboli" energetici e selezionare gli interventi di riqualificazione maggiormente efficaci ed economicamente sostenibili.

L'aggiunta di logiche evolutive, basate sulle statistiche di accrescimento della città nonché di intervento sul patrimonio esistente, ha permesso anche di prevedere i possibili sviluppi futuri dei fabbisogni energetici e delle relative emissioni di CO<sub>2</sub>. È stato dunque possibile mettere in relazione l'evoluzione dell'impatto ecologico della città con l'entità degli interventi di efficienza energetica che verranno realizzati e quindi, indirettamente, con l'orientamento politico in fatto di incentivazione. In base a tali valutazioni si è arrivati ad individuare le azioni necessarie per il raggiungimento dell'obiettivo di riduzione dell'emissione di gas serra del 20% entro il 2020 a cui si è impegnata la città di Roma il 4 Maggio 2010 aderendo al Patto dei Sindaci. Le azioni individuate non solo permettono il raggiungimento di tale impegno, ma determinano anche il minor aggravio economico per la collettività, poiché sono frutto di uno studio di ottimizzazione energetico/economica degli interventi.

In base a quanto detto si ritiene che il lavoro di ricerca svolto possa essere di ausilio sia alle amministrazioni pubbliche per individuare le modalità di raggiungimento degli obiettivi energetici prefissati, sia a ricercatori, professionisti o semplici privati per valutare le prestazioni energetiche degli edifici confrontando diverse soluzioni, anche innovative, dal punto di vista non solo energetico ma anche economico.

**Sviluppi futuri**

Dal punto di vista del software la filosofia *open-source* con cui è stato realizzato Archi-Energy rappresenta un invito nei confronti della comunità scientifica per partecipare al progetto ed ampliare le possibilità e le funzionalità del programma. Gli sviluppi possibili sono molto ampi e interessano principalmente la possibilità di estendere il calcolo a strutture multi-zona, introdurre tecnologie innovative, migliorare ulteriormente l'accuratezza dei calcoli, implementare algoritmi pseudo-dinamici per tenere maggiormente in considerazione l'inerzia termica dell'edificio, ecc.

Dal punto di vista delle applicazioni non vi sono limitazioni. Sarebbe possibile estendere lo studio ad altri edifici o altre città. L'augurio è che il sistema venga utilizzato il più possibile e che possa concorrere al miglioramento energetico e ambientale delle nostre città.

## **Bibliografia**

## Bibliografia

### Riferimenti bibliografici sull'efficienza energetica degli edifici

#### LIBRI, MANUALI, TESI, SAGGI, REPORT, ATTI

- De Santoli, *Le comunità dell'energia*, Quodlibet, Macerata, 2011.
- De Santoli, *La gestione energetica degli edifici*, Dario Flaccovio Editore srl, Palermo, 2010.
- De Santoli, Caruso, Mancini, *L'esperienza di gestione energetica del patrimonio edilizio dell'Università di Roma La Sapienza: il programma-quadro di efficientamento energetico*, Facility Management Italia, 2010.
- De Santoli, Mancini, *Raffrescamento estivo. Verifica di una procedura semplificata per la valutazione dei fabbisogni energetici*, CDA condizionamento dell'aria riscaldamento refrigerazione, 2007.
- Caruso, De Santoli, Giamminuti, Sodani, *A CHCP system constituted by a microturbine and an exhaust absorption chiller*, 4th European Conference on energy performance and indoor climate in buildings, Lyon, France, 2006.
- Spiekman M., Lahrech R., De Boer J., *Applying the EPBD to improve the Energy Performance Requirements to Existing Buildings*, Intelligent Europe, 2007.
- Diso D., *Vetri ed energia solare*, Università di Lecce, 11/05/2004.
- Morè P., *Tecniche di efficienza energetica nel miglioramento dell'involucro*, Politecnico di Milano, 2007.
- IEA (International Energy Agency), *Daylighting in buildings*, 2000.
- AA.VV., *Libro Bianco "Energia-Ambiente-Edificio"*, Il Sole24Ore, Milano, 2004.

- AA.VV., *Progettare l'involucro edilizio: correlazioni tra il sistema edificio e i sistemi impiantistici*, Atti del Convegno AICARR, Napoli, 2002.
- AA.VV., *Recupero edilizio*, Alinea, Firenze, 1988.
- Allen G., Moro M., Buro L. (a cura di), *Repertorio dei materiali per la bioedilizia*, Maggioli Editore, Rimini 2001.
- American Federation of Teachers (AFT), *Green Schools and Colleges*, AFT resolution adopted by the AFT executive council, 2008.
- Bevivino A., *Tesi di laurea in Ingegneria Elettrica dal titolo "Progettazione degli impianti elettrici e di Building Automation di uno studentato universitario con l'utilizzo di tecnologie innovative finalizzate al comfort ed al risparmio energetico"*, Facoltà di Ingegneria, Università di Roma - La Sapienza, 2007.
- Amirante M. I., Violano A., *The energy quality of enclosure for housebuilding*, *Atti del Convegno Mondiale sulle Energie Rinnovabili (TIA - Sustainable Teaching for Sustainable Architecture 2006)*, Elsevier, Wrec, 2006.
- ASHRAE 62.1, *Ventilation for acceptable Indoor Air Quality*, ASHRAE (USA), 2007.
- Asquini L., Oleotto E., Bassi L., *Efficienza energetica e sostenibilità - Linee guida per interventi su edifici esistenti e di nuova costruzione con schede di valutazione dei materiali*, EdicomEdizioni, Udine, 2008.
- Baker N., *The Handbook of Sustainable Refurbishment. Non-Domestic Buildings*, Hoepli, Milano, 2010.
- Capolongo S., Daglio L., Oberti I., *Edificio, Salute, Ambiente*, Hoepli, Milano, 2007.
- Cellai G., Raffellini G., Secchi S., *Certificazione energetica: problematiche e possibili risposte alla luce del quadro normativo europeo, nazionale, regionale*, Atti del Convegno Naz. AICARR/SAIE, Bologna, 2008.

- Chiesi A., *Riconvertire i luoghi*, Postmedia, Milano, 2008.
- *The Energy Efficiency of Dwellings*. Initial Analysis, London (UK), 2006
- Fabbri K., *Guida alla riqualificazione energetica*, DEI, Roma, 2007.
- Feist W. Fachinformation PHI-2002/2, Passivhaus Institut, 2002.
- Fracastoro G., *The evaluation of energy saving potential of building retrofit at region or national scale*, in Atti del Convegno AICARR, Milano, ottobre 2008.
- Lantschner N., *Casaclima il piacere di abitare*, Athesia, Bolzano, 2008.
- Longhi G., *Linee guida per una progettazione sostenibile*, Officina, Roma, 2003.
- Mazzola E.M., *Verso un'architettura sostenibile*, Gangemi, Roma, 2007.
- Neri P. (a cura di), *Verso la valutazione ambientale degli edifici, Life Cycle Assessment a supporto della progettazione eco-sostenibile*, Alinea editrice, Firenze, 2008.
- Rava P., *Tecniche costruttive per l'efficienza energetica e la sostenibilità*, Maggioli Editore, Rimini, 2007.
- Trevisi A.S., *Efficienza in edilizia: diagnosi energetica*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2007.
- Lucchini A., *La riqualificazione energetica dell'esistente*, in Modulo, n.345/2008.
- P. Oldfield, D. Trabucco, A. Wood-*"Five energy generations of tall buildings: a historical analysis of energy consumption in high rise buildings"*-2008.
- Chen A., *The New York Times Building: Designing for Energy Efficiency Through Daylighting Research*, Scienze beat, Berkeley lab, 2004.
- Cresme, *Rapporto Saienergia 2010 Costruzioni e efficienza energetica dai presupposti al mercato reale*, Ottobre 2010.



- ENEA e BEST- Politecnico di Milano, *Rapporto sui dati di benchmark definiti attraverso il set di simulazioni dinamiche cui riferire il potenziale dato dagli interventi di contenimento dei consumi*, Settembre 2011.
- ENEA, *“L’efficienza energetica nel settore civile”*, Luglio 2011.
- ISTAT, *Indicatori ambientali urbani, 2010*.
- AA.VV., *Efficienza Energetica degli edifici: prestazioni termiche, comportamento ambientale*, Ed.Rockwool, Milano, 2006.
- AA.VV., *Guida per la progettazione di edifici a basso consumo energetico*, Il Sole24Ore, Milano, 2008.
- AA.VV., *Impianti, edifici, città. Integrazione e nuove visioni di progetto e di gestione*, Atti Convegno internazionale AICARR, Milano, 2004.
- AA.VV., *L’efficienza energetica nei regolamenti edilizi. Linee guida*, Provincia di Milano, 2006.
- AA.VV., *La qualità ambientale degli edifici*, Maggioli Editore, Rimini, 1998.
- AA.VV., *Le regioni italiane e la bioedilizia - Le esperienze e le proposte per una normativa in materia*, Edicom Edizioni, Monfalcone, 2008.

---

**Riferimenti bibliografici sul calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici**

## LIBRI, MANUALI, TESI, SAGGI, REPORT, ATTI

- De Santoli, Mancini, *Prestazioni energetiche degli edifici: le norme UNI TS 11300-3/4*, AICARR Milano, Padova, 16/06/2011.
- De Santoli, Moncada Lo Giudice, *Beeps (Building Energy and Environment performance System): a programme for Italy*, National Conference "Building Sustainability, Value and Profit", Edimburgh, Scotland 2003.
- Iaschi M., *ECOTECH - Modellazione e analisi solare*, Facoltà di architettura, Università IUAV di Venezia, 2006.
- BRINJAC Engineering, *Energy and environmental effects of high light reflectance ceilings*, Harrisburg, USA, 2006.
- Busa L., Cellai G., Secchi S., *Certificazione energetica degli edifici: metodologie di calcolo dei consumi energetici per l'illuminazione*, Dipartimento Tecnologie dell'Architettura e Design "Pierluigi Spadolini", Firenze, 2006.
- Chen, Li, Zhang, Spitler, Fisher, *Investigation of the accuracy of calculation methods for conduction transfer function of building construction*, Shenzhen, China, 2006.
- Delsante, *A response-factor method for calculating coupled heat and moisture transfer in buildings*, CSIRO, Victoria, Australia.
- Dubois M.C., *Solar shading and building Energy use; Literature review*, Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.
- ES-SO, *Energy saving and CO<sub>2</sub> reduction potential from solar shading systems and shutters in the EU-25*, European Solar-Shading Organization, 2006.
- Martirano L., *Dispense del corso di "Domotica ed uso razionale dell'energia elettrica"*, Università degli studi di Roma, La Sapienza, Facoltà di Ingegneria, Corso di laurea in Ingegneria Elettrica, 2006.

- 
- Parise G., *Dispense del corso di "Distribuzione ed utilizzazione dell'energia elettrica"*, Università degli studi di Roma, La Sapienza, Facoltà di Ingegneria, Corso di laurea in Ingegneria Elettrica, 2006.
  - Baggio P., Cappelletti F., Gasparella A., Romagnoni P., *Il calcolo della prestazione energetica degli edifici. Gli esiti di un confronto, Atti del Convegno AiCARR, Riduzione dei fabbisogni, recupero di efficienza e fonti rinnovabili per il risparmio energetico nel settore residenziale*, Padova, 2008.
  - Fraisse G., Virgone J., *Modelisation numerique d'un bâtiment multi zone sous TRNSYS*, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Chambéry, Le Bourget du Lac; Centre de Thermique de Lyon, INSA, Lione, Francia
  - Galasiu, Atif, MacDonald, *Impact of window blinds on daylight-linked dimming and automatic on/off lighting controls*, NRC, Canada, 2004
  - Kotey N.A., Wright J.L., *Simplified solar optical calculations for windows with venetian blinds*, University of Waterloo, Canada
  - LBNL, *Simulating the operation of photosensor-based lighting controls*, University of California, Febbraio 2001
  - Mardaljevic J., *The Energy benefit of advanced façades: Electrochromic grazing versus photovoltaics*, Institute of Energy and sustainable development, De Montfort University, Leicester, UK
  - Newsham, Sander, *The effect of office design on workstation lighting: a simulation study*, NRC (National Research Council Canada), Canada, 2003
  - Tilmann, Kuhn, *Solar control: comparison of two new systems with the state of the art on the basis of a new general evaluation method for façades with venetian blinds or other solare control systems*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, 2004
  - Tzempelikos A., Athienitis A. K., *The effect of shading design and control on building cooling demand*, Concordia University, Montreal, Canada, 2005

- Tzempelikos A., *A methodology for detailed calculation of room illuminance levels and light dimming in a room with motorized blinds integrated in an advanced window*, Montreal, Canada, 2004
- Tzempelikos A., Athienitis A. K., *Simulation for façade options and impact on HVAC system design*, Concordia University, Montreal, Canada, 2003
- Vartiainen E., *Daylight modelling and optimization of solar facades*, Helsinki University of Technology, Engineering physics, Espoo 2000
- Roulet C. A., *EPBD and CEN TC 89: Assessment of Energy performance of buildings*, REHVA, 2007
- Crisci G. (a cura di), *La Certificazione Energetica degli edifici. Strumenti e metodi*, Luciano Editore, Napoli, 2007.
- U.S. Environmental Protection Agency, *ENERGY STAR®. Building Upgrade Manual*, Office of Air and Radiation, 2008 Edition.

**Riferimenti bibliografici inerenti allo studio sull'edilizia residenziale di Roma**

## LIBRI, MANUALI, TESI, SAGGI, REPORT, ATTI

- ISTAT, *Censimento della popolazione e delle abitazioni 2001*.
- Lucarelli M.T., (a cura di), *L'ambiente dell'organismo città. Strategie e sperimentazioni per una nuova qualità urbana*, Alinea, Firenze, 2006.
- Nuzzo E., Tomasinsig E., *Recupero ecoefficiente del costruito - Confronto tra soluzioni migliorative di pareti, coperture e solai*, EdicomEdizioni, Udine, 2008.
- Accasto G., Fraticelli V., Nicolini R., *L'architettura di Roma Capitale.1870-1970*, Golem, Roma, 1971.
- Castagnoli F., Cecchelli C, Giovannoni G., Zocca M.(a cura di), *Topografia e urbanistica di Roma*, Cappelli,Bologna, 1958.
- De Angelis D'Ossat G., *L'architettura a Roma negli ultimi tre decenni del secolo XIX*, in *Annuario dell'Accademia di San Luca*, Roma, 1942.
- De Guttry I., *Guida di Roma Moderna dal 1870 ad oggi*, Leonardo Arte, Roma, 1989.
- Insolera I., *Roma moderna, un secolo di storia urbanistica.1870-1970*, Einaudi Torino, 1962.
- Negri E., *Caratteri generali dell'architettura in Roma da G. Valadier a E. Basile*, in *Atti dei Terzo Congresso Nazionale di Studi Romani*, Roma, 1935.
- Piacentini M., *Le vicende edilizie di Roma dal 1870 ad Oggi*, Fratelli Palombi, Roma,1952.
- Strappa G., Mercurio G., *Architettura Moderna a Roma e nel Lazio 1920-1945*. Atlante, Roma, 1996.
- Strappa G. (a cura di), *Tradizione e innovazione nell'architettura di Roma Capitale 1870-1930*, Roma, 1989.

- Toschi L, *Edilizia economica e popolare nello sviluppo urbanistico di Roma moderna (1870- 1903)*, Roma, 1983.
- Zocca M. (a cura di), *Roma Capitale d'Italia, in Istituto Studi Romani, Topografia e Urbanistica di Roma*, Bologna, 1958.
- Caniggia G., Il clima architettonico romano e la città universitaria, in LA CASA, n.6/1959.
- ENEA, *Rapporto Le detrazioni fiscali del 55% per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente nel 2009*, Dicembre 2010
- ENEA, *Quadro di sintesi preliminare dei dati del triennio 2007/2009 per le detrazioni fiscali del 55% relative alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente*, Aprile 2010

**Riferimenti normativi**

- Legge 10 del 9 Gennaio 1991, *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*; sue modifiche e integrazioni.
- Direttiva Europea 2002/91/CE (EPBD), *Rendimento energetico in edilizia*.
- DPR 412 del 26/08/1993, *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 dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10*; sue modifiche e integrazioni.
- Agenzia delle Dogane, Testo Unico n. 504 del 26 Ottobre 1995, *Testo Unico Accise*; sue modifiche e integrazioni.
- DPR 380 del 6 Giugno 2001, *Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia*, e sue modifiche e integrazioni.
- Decreto Legislativo 192 del 19 Agosto 2005, *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*; sue modifiche e integrazioni.
- Decreto Legislativo n. 387 del 29 Dicembre 2003, *Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità*; sue modifiche e integrazioni.
- Direttiva Europea 2006-32-CE *concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio*.
- Legge n. 296 del 27/12/2006, *Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato (legge finanziaria 2007)*, e sue modifiche e integrazioni.
- DM Sviluppo Economico 19/02/2007, *Criteri e modalità per incentivare la produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte*

*solare - cd. "Conto energia" - Attuazione articolo 7, Dlgs 387/2003; sue modifiche e integrazioni.*

- *DM 19/02/2007, Disposizioni in materia di detrazioni per le spese di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, ai sensi dell'articolo 1, comma 349, della legge 27 dicembre 2006, n. 296; sue modifiche e integrazioni.*
- *Delibera AEEG n.280/07, Modalità e condizioni tecnico-economiche per il ritiro dell'energia elettrica ai sensi dell'articolo 13, commi 3 e 4, del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387/03, e del comma 41 della legge 23 agosto 2004, n. 239/04, sue modifiche e integrazioni.*
- *Delibera AEEG n.156/07, Testo integrato di vendita (TIV), sue modifiche e integrazioni.*
- *Circolare Agenzia Entrate n. 46-E, Articolo 7, comma 2, del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387 – Disciplina fiscale degli incentivi per gli impianti fotovoltaici.*
- *Decreto Legislativo n. 155 del 30 Maggio 2008, 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; sue modifiche e integrazioni.*
- *Delibera AEEG n. ARG/elt 74/08, Testo integrato delle modalità e delle condizioni tecnico economiche per lo scambio sul posto (TISP), sue modifiche e integrazioni.*
- *Legge n. 2 del 28 Gennaio 2009, Misure urgenti per il sostegno a famiglie, lavoro, occupazione e impresa e per ridisegnare in funzione anti-crisi il quadro strategico nazionali; sue modifiche e integrazioni.*
- *DPR n.59 del 2 Aprile 2009, 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; sue modifiche e integrazioni.*



- *Direttiva Europea 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.*
- *DM 26/06/2009, Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici; sue modifiche e integrazioni.*
- *Direttiva Europea 2010/31/CE sulla prestazione energetica nell'edilizia.*
- *DL n.28 del 3 Marzo 2011, Attuazione della Direttiva 2009/28/CE - Decreto Rinnovabili; sue modifiche e integrazioni.*
- *DM 5 Luglio 2012, Attuazione dell'art. 25 del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28, recante incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti solari fotovoltaici (c.d. Quinto Conto Energia); sue modifiche e integrazioni.*

## Norme tecniche

- UNI TS 11300, *Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*, 2008.
- UNI TS 11300, *Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria*, 2008.
- UNI TS 11300, *Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva*, 2010.
- UNI TS 11300, *Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria*, 2012.
- UNI EN 15232:2010, *Prestazione energetica degli edifici - Incidenza dell'automazione, della regolazione e della gestione tecnica degli edifici*, 2010.
- UNI EN 15217:2007, *Prestazione energetica degli edifici - Metodi per esprimere la prestazione energetica e per la certificazione energetica degli edifici*, 2007.
- UNI EN 15193:2008, *Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione*, 2008.
- UNI EN ISO 14683:2008, *Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento*, 2008.
- UNI EN ISO 13790:2007, *Prestazione termica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento*, 2007.
- UNI EN ISO 13789:2001, *Prestazione termica degli edifici - Coefficiente di perdita di calore per trasmissione - Metodo di calcolo*, 2001.
- UNI EN ISO 13786:2001, *Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo*, 2001.

- UNI EN 13363-1:2004, *Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 1: Metodo semplificato*, 2004.
- UNI EN 13363-2:2006, *Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 1: Metodo dettagliato*, 2006.
- UNI EN 12464-1:2004, *Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro interni*, 2004.
- UNI 10379:2005, *Riscaldamento degli edifici - Fabbisogno energetico convenzionale normalizzato*, 2005.
- UNI 10355:1994, *Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo*, 1994.
- UNI 10351:1994, *Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore*, 1994.
- UNI EN ISO 10077-1:2002, *Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Calcolo della trasmittanza termica - Metodo semplificato*, 2002.
- UNI EN ISO 6946:1999, *Componenti e elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo*, 1999
- UNI EN 832:2001, *Prestazione termica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento - Edifici residenziali*
- ASHRAE, 2005 ASHRAE Handbook - *Fundamentals*, Atlanta USA, 2005

**Siti web**

- ISTAT, <http://www.istat.it/it/>
- ENEA, *Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente*, <http://www.enea.it/>
- ENEA ACS, <http://efficienzaenergetica.acs.enea.it/decreti.htm>
- EDILIO, *Portale sull'edilizia*, <http://www.edilio.it/>
- EDILPORTALE, *Portale sull'edilizia*, <http://www.edilportale.com/>
- ITC, CNR, *Istituto per le Tecnologie della Costruzione*, <http://www.itc.cnr.it/home.asp?idtesto=185&idkunta=185&PaginaBianca=46>
- CTI, *Comitato Termotecnico Italiano*, <http://www.cti2000.it/>
- CEI, *Comitato Elettrotecnico Italiano*, <http://www.ceiuni.it/>
- UNI, *Ente Nazionale Italiano di Unificazione*, <http://www.uni.com/it/>
- Watts Industries, <http://www.wattsindustries.com/index.aspx>
- ACCA Software, <http://www.acca.it/>
- PV GIS, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- LBNL, *Daylighting the New York Times Headquarters building*, [http://windows.lbl.gov/comm\\_perf/nyt\\_overview.html](http://windows.lbl.gov/comm_perf/nyt_overview.html)
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, [http://www.ise.fhg.de/welcome-to-the-web-pages-of-the-fraunhofer-institute-for-solar-energy-systems-in-freiburg-germany/view?set\\_language=en](http://www.ise.fhg.de/welcome-to-the-web-pages-of-the-fraunhofer-institute-for-solar-energy-systems-in-freiburg-germany/view?set_language=en)
- Clivet, <http://www.clivet.com/>
- Buderus, <http://www.buderus.it>
- Riello, <http://www.riello.it/>
- Aermec, <http://www.aermec.com/it-it/default.asp>
- Caleffi, [http://www.caleffi.it/caleffi/it\\_IT/index.sdo](http://www.caleffi.it/caleffi/it_IT/index.sdo)

- Refcomp cogenerazione, <http://www.refcompcogeneration.it/it-IT/homepage.aspx>
- GSE, <http://www.gse.it/it/Pages/default.aspx>
- Autorità energia elettrica e gas, <http://www.autorita.energia.it/it/index.htm>
- Idrosistemi,
- Blue Box condizionamento, <http://www.bluebox.it/it/index.php>
- Solon, <http://www.solon.com/it/index.html>
- Power One, <http://it.power-one.com/>
- Satel-light, *Daylight and solar radiation data al lover Europe*, <http://www.satel-light.com/indexgA.htm>
- Texas A&M Libraries, *Grande archivio di articoli scientifici*, [http://txspace.tamu.edu/browse-title?starts\\_with=control](http://txspace.tamu.edu/browse-title?starts_with=control)
- European Commission, Directorate-General for Energy and Transport, EPBD Buildings platoform, *Fonte di informazioni sulla EPBD*, <http://www.buildingsplatform.org/cms/>
- ES-SO, *European Solar-Shading Organization*, <http://www.es-so.com/1.html>
- Robur, <http://www.robur.it/>