

# POLITECNICO DI TORINO

Area dell'INGEGNERIA

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Edile**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Utilizzo e sviluppo di strumenti di simulazione in regime dinamico ai fini della diagnosi energetica nella progettazione integrata**



**Relatore**

prof. Vincenzo Corrado

*firma del relatore*

.....

**Candidato**

Marco Galassi

*firma del candidato*

.....

Luglio 2019



## Sommar

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduzione .....                                                                | 1  |
| Scopo .....                                                                       | 4  |
| Capitolo 1 – Valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici .....        | 5  |
| 1.1 Modelli di calcolo semi-stazionari .....                                      | 5  |
| 1.2 Modelli di calcolo dinamici .....                                             | 9  |
| 1.2.1 L’inerzia termica e il regime sinusoidale .....                             | 9  |
| 1.2.2 Metodi per l’integrazione di Fourier .....                                  | 12 |
| 1.2.2.1 Metodo della trasformata di Laplace .....                                 | 15 |
| 1.2.2.2 Metodo della Z-trasformata .....                                          | 20 |
| 1.2.2.3 Metodo armonico .....                                                     | 24 |
| 1.2.2.4 Metodo agli elementi finiti .....                                         | 28 |
| 1.2.2.5 Metodo alle differenze finite (CFD) .....                                 | 35 |
| Capitolo 2: Algoritmi di simulazione termo-energetica dinamica: Energy Plus ..... | 37 |
| 2.1 Air Heat balance .....                                                        | 40 |
| 2.2 Inside heat balance .....                                                     | 41 |
| 2.3 Outside surface heat balance .....                                            | 42 |
| Capitolo 3 - Inquadramento del caso di studio: Palazzo Corte Riflessa .....       | 43 |
| 3.1 Descrizione tipologica del fabbricato .....                                   | 44 |
| 3.1.1 Descrizione dell’involucro esistente .....                                  | 48 |
| 3.1.2 Descrizione dell’impianto esistente .....                                   | 53 |
| 3.2 Descrizione dello stato di progetto .....                                     | 53 |
| 3.2.1 Descrizione dell’involucro di progetto .....                                | 60 |
| 3.2.2 Descrizione dell’impianto di progetto .....                                 | 66 |
| 3.2.2.1 Centrale termofrigorifera .....                                           | 66 |
| 3.2.2.2 Impianto di climatizzazione .....                                         | 68 |
| 3.2.2.3 Impianto idrico sanitario .....                                           | 71 |
| 3.2.2.4 Impianto aeraulico .....                                                  | 72 |
| 3.3 Valutazione economica .....                                                   | 72 |
| Capitolo 4 - Il modello di calcolo dinamico: Design Builder .....                 | 75 |
| 4.1 Il software .....                                                             | 75 |
| 4.2 La modellazione .....                                                         | 75 |
| 4.3 Input del programma .....                                                     | 76 |
| 4.4 Definizione dell’utenza .....                                                 | 78 |

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5 Output del programma .....                                         | 78  |
| 4.5.1 Calcolo del fabbisogno invernale ed estivo.....                  | 78  |
| 4.5.2 La simulazione dinamica.....                                     | 80  |
| 4.5.3 Analisi fluidodinamica computazionale (CFD) .....                | 81  |
| Capitolo 5 - Applicazione del calcolo dinamico al caso di studio ..... | 82  |
| 5.1 Modellazione edificio con Design Builder .....                     | 82  |
| 5.1.1 Dati climatici .....                                             | 83  |
| 5.1.2 Attività .....                                                   | 83  |
| 5.1.3 Costruzione.....                                                 | 86  |
| 5.1.4 Aperture .....                                                   | 87  |
| 5.1.5 Illuminazione .....                                              | 88  |
| 5.1.6 HVAC.....                                                        | 88  |
| 5.2 Calcolo del carico invernale.....                                  | 94  |
| 5.3 Calcolo del carico termico estivo.....                             | 96  |
| 5.4 La simulazione dinamica.....                                       | 100 |
| 5.4.1 Periodo invernale .....                                          | 100 |
| 5.4.2 Periodo estivo.....                                              | 105 |
| Capitolo 6 - Analisi e discussione dei risultati .....                 | 110 |
| 6.1 Confronto tra stato attuale e progetto .....                       | 110 |
| 6.1.1 Fabbisogno di riscaldamento e di raffrescamento.....             | 110 |
| 6.1.2 Comportamento pareti, solai e vetrate.....                       | 112 |
| 6.1.3 Apporti interni .....                                            | 115 |
| 6.1.4 Considerazioni finali .....                                      | 116 |
| 6.2 Confronto tra progetto ed edificio di riferimento.....             | 117 |
| 6.2.1 Fabbisogno di riscaldamento e di raffrescamento.....             | 119 |
| 6.2.2 Comportamento pareti, solai e vetrate.....                       | 121 |
| 6.2.3 Apporti interni .....                                            | 124 |
| 6.2.4 Considerazioni finali .....                                      | 125 |
| 6.3 Calcolo della prestazione energetica.....                          | 126 |
| 6.4 Calcolo dei costi di energia.....                                  | 129 |
| 6.5 Valutazione della sostenibilità dell'intervento edilizio .....     | 131 |
| Conclusioni .....                                                      | 132 |
| Ringraziamenti.....                                                    | 134 |
| Bibliografia .....                                                     | 135 |
| Normativa tecnica .....                                                | 135 |
| Webgrafia .....                                                        | 136 |

## Introduzione

La progettazione integrale nasce dall'esigenza di superare il problema di scarsa coordinazione e collaborazione tra gli attori che partecipano alla realizzazione di un edificio. Nella progettazione edilizia tradizionale, infatti, il progettista sviluppava un progetto preliminare e solo nelle fasi successive subentravano gli altri professionisti al fine di sviluppare ulteriormente il progetto e renderlo efficiente. Questo metodo però, portava nella maggior parte dei casi a ricorrere soluzioni tecnologiche ad alta prestazione che però si rilevavano poco efficienti, in alcuni casi addirittura fallimentari. In particolare, si sono verificati tipologie di soluzioni non corrette, come ad esempio:

- Apporti termici solari non considerati correttamente;
- Esposizione delle pareti vetrate a sud, con la conseguente richiesta di un maggior fabbisogno energetico per il raffrescamento;
- Scarso utilizzo dell'illuminazione naturale, dovuto ad esempio ad un orientamento dell'edificio non corretto;
- Esposizione degli utenti ad ambienti non confortevoli, sempre per lo stesso motivo del punto precedente;
- Necessità di ricorrere ad impianti tecnologici avanzati per garantire il riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione per far fronte ai problemi appena citati, che si traducevano in un incremento maggiore di costi di realizzazione e di manutenzione degli impianti stessi.

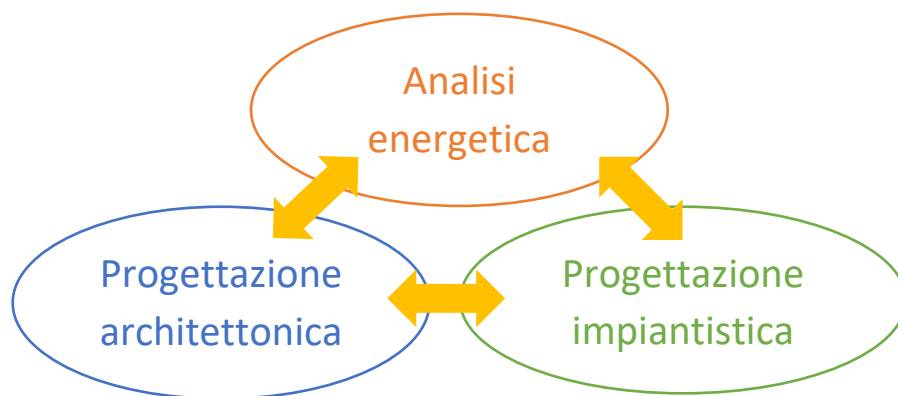
Senza contare il grave problema delle emissioni di CO<sub>2</sub>, dovute al notevole impiego di fonti energetiche di origine fossile che causano danni irreversibili dal punto di vista ambientale e climatico. Il settore dell'edilizia, infatti, rappresenta una delle cause maggiori sulla quantità di gas serra presenti in atmosfera. Appare evidente che si necessita di un cambio di mentalità e di tendenza sul metodo con cui è stata affrontata la progettazione edilizia degli ultimi decenni. Sarebbe opportuno, quindi, coinvolgere le tematiche energetiche fin dalla fase di concezione dell'edificio, evitando di demandarle nelle fasi successive. Solo con precise ed accurate attenzioni in ogni fase dell'intero ciclo di vita dell'edificio sarà possibile ridurre notevolmente gli impatti che genera il settore edilizio.



**Figura 1 – Schema esemplificativo approccio progettuale tradizionale**

Dal punto di vista energetico, la progettazione di edifici efficienti richiede un corretto iter progettuale, caratterizzato da momenti di analisi e momenti di sintesi, collegati tra loro all'interno di uno specifico sistema complesso. In particolare, si tratta di una sorta di connessione di idee e pensieri, di analisi e valutazioni, di momenti interpretativi e di momenti propositivi, di scelte formali in assonanza con le esigenze ambientali. Tutto ciò si evolve in una progettazione integrale iterativa e interattiva, condotta su più livelli contemporaneamente, integrata con struttura e impianti tecnologici.

Solo in questo modo le valutazioni di tipo energetiche saranno effettuate sin dalla fase preliminare, durante la quale il progettista architettonico, il progettista strutturale, i progettisti degli impianti e tutte le altre figure professionali coinvolte interagiscono fra loro.



**Figura 2 – Schema esemplificativo approccio progettuale integrata**

Il risultato di un'ottima progettazione integrale è un edificio ad alte prestazioni contraddistinto dalle seguenti caratteristiche principali:

- Basso consumo di risorse non rinnovabili;
- Bassi livelli di emissioni;
- Basso impatto ambientale;
- Fabbisogni energetici per il riscaldamento e condizionamento contenuti;
- Alto livello di confort termoigrometrico degli ambienti interni;
- Costi di manutenzione limitati;

Lo scopo della progettazione è, quindi, sia quello di minimizzare il fabbisogno energetico durante l'intero ciclo di vita dell'edificio, sia quello di garantire un elevato confort dell'uso e della funzionalità di quest'ultimo. Tutto questo senza perdere di vista gli obiettivi di ridurre gli effetti dannosi sull'ambiente e di promuovere l'utilizzo di fonti di energia rinnovabili, con particolare attenzione sui costi.

Il grande vantaggio di applicare tale approccio già nella fase preliminare è quello di ottenere ampi margini di intervento e nei costi di costruzione e di esercizio. Più ci si avvicina alla realizzazione dell'opera, infatti, il margine su cui intervenire diminuisce ed i costi connessi alle varianti tendono ad aumentare come si evince dal grafico dell'incidenza delle scelte sulla prestazione dell'edificio in figura 3.

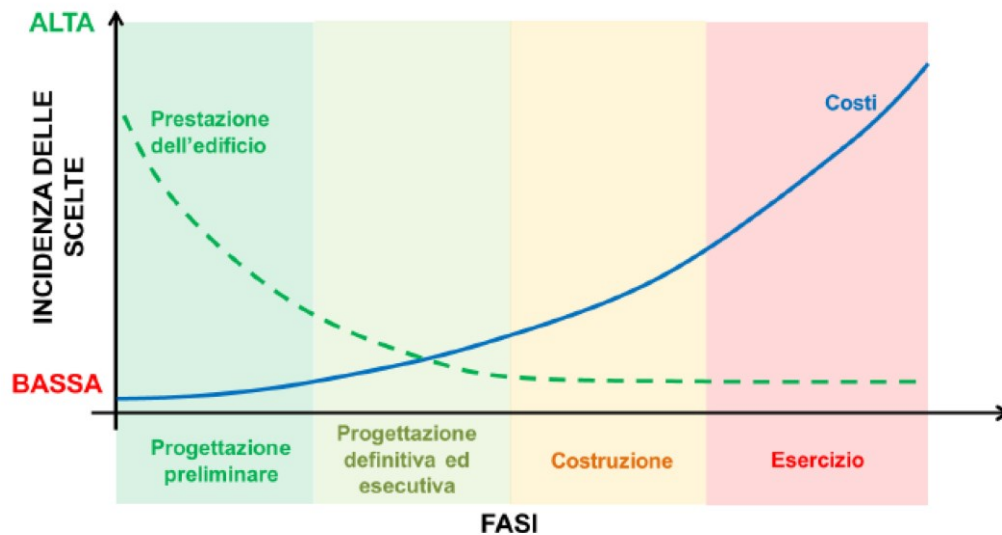


Figura 3: diagramma impatto dei costi-prestazione dell'edificio

Nella progettazione di edifici efficienti dal punto di vista energetico, quindi, la figura dell'esperto energetico ricopre un ruolo fondamentale. Egli deve fungere da cerniera tra il sotto sistema degli impianti tecnologici e quello relativo alla progettazione architettonica. Per svolgere tale ruolo e far interagire questi mondi, egli deve essere in grado di adoperare strumenti di simulazione dettagliata in modo da saper gestire e valutare in maniera corretta gli effetti sul comportamento energetico dell'edificio dovute alle scelte progettuali che si intendono adottare. Per questi motivi il professionista deve possedere competenze sia del progettista architettonico, che del progettista impiantistico. Grazie alla propria formazione ed esperienza acquisita, egli sarà in grado di formulare nuove soluzioni da riesaminare, in un processo iterativo che viene ripetuto fino a quando non si giunge ad una soluzione soddisfacente dal punto di vista energetico, funzionale ed economico.



Figura 4: processo circolare di ottimizzazione del progetto nella progettazione integrata

## Scopo

Per quanto sopra introdotto, lo scopo principale della presente tesi consiste nello sviluppo di una simulazione energetica in regime dinamico, finalizzato al supporto della progettazione integrata per un intervento di riqualificazione di un edificio.

In particolare, presso l'azienda L.i.c.t.i.s. srl, è stato individuato un caso di studio reale, in cui sono previsti lavori per la riqualificazione energetica dell'involucro ed impiantistica.

L'obiettivo principale è quello di verificare l'idoneità delle tecnologie costruttive ed impiantistiche che si intendono adottare al fine di ottenere alte prestazioni, e in secondo luogo quello di facilitare la diffusione di tale approccio.

Per raggiungere tali obiettivi, il primo passo è stato quello di impostare un calcolo dinamico dell'edificio nello stato di fatto e un calcolo dinamico con le migliorie che si intendono effettuare e sono stati messi a confronto. Successivamente è stato impostato un calcolo dinamico dell'edificio di riferimento per eseguire la verifica progettuale.

Per tutti e tre i casi è stato scelto di studiare il comportamento del sistema edificio-impianto mediante Design Builder, un software di interfaccia grafica del motore di calcolo EnergyPlus.

Una volta impostati i modelli, sono state eseguite le simulazioni energetiche in regime dinamico per valutare le scelte progettuali e osservare le incidenze sulle prestazioni dell'intero sistema.



**Figura 5 – Vista su Via Garibaldi angolo Sant'Agostino dell'immobile oggetto di studio**



## Capitolo 1 – Valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici

### 1.1 Modelli di calcolo semi-stazionari

In Italia, i modelli di calcolo attualmente in vigore per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici sono di tipo semi-stazionario. In particolare, si fa riferimento alla specifica tecnica UNI TS 11300, la quale si articola in quattro parti:

- Parte 1: determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
- Parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali.
- Parte 3: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva.
- Parte 4: utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

La procedura di calcolo è caratterizzata dalle seguenti fasi:

- 1) Definizione dei confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e non climatizzati dell'edificio.
- 2) Definizione dei confini delle diverse zone di calcolo.
- 3) Definizione delle condizioni interne di calcolo e dei dati di ingresso relativi al clima esterno.
- 4) Calcolo, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni ideali di energia termica per il riscaldamento " $Q_{H,nd}$ " e raffrescamento " $Q_{C,nd}$ ".
- 5) Calcolo della stagione di riscaldamento e di raffrescamento.
- 6) Per i mesi estremi della stagione di riscaldamento e di raffrescamento, eventuale ricalcolo dei fabbisogni di energia sulle frazioni di mese comprese rispettivamente nelle stagioni di riscaldamento e di raffrescamento.
- 7) Eventuale calcolo dei fabbisogni di energia termica per umidificazione " $Q_{H,hum,nd}$ " e per deumidificazione " $Q_{H,dhum,nd}$ ".
- 8) Aggregazione dei risultati relativi alle diverse zone servite dagli stessi impianti.

Per quanto concerne i dati climatici, la UNI TS 11300-1 fa riferimento alle medie mensili delle temperature esterne " $\theta_e$ ", all'irradianza solare totale media mensile sul piano orizzontale " $I_{sol,h}$ ", all'irradianza solare totale media mensile per ciascun orientamento " $I_{sol}$ ". Tali dati sono ricavabili dalla UNI EN 10349.

Nello specifico, ai passi 4 e 6 della procedura di calcolo, i fabbisogni ideali di energia termica per il riscaldamento e raffrescamento si calcolano, per ogni zona termica dell'edificio e per ogni mese o frazione di mese, mediante le seguenti equazioni:

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

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad [2]$$

Dove:

- $Q_{H/C,ht}$  è lo scambio di energia termica totale nel caso di riscaldamento/raffrescamento [MJ]
- $Q_{H/C,tr}$  è lo scambio di energia termica per trasmissione nel caso di riscaldamento/raffrescamento [MJ]
- $Q_{H/C,ve}$  è lo scambio di energia termica per ventilazione nel caso di riscaldamento/raffrescamento [MJ]
- $Q_{gn}$  sono gli apporti totali di energia termica [MJ]
- $Q_{int}$  sono gli apporti di energia termica dovuti a sorgenti interne [MJ]
- $Q_{sol,w}$  Sono gli apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati [MJ]
- $\eta_{H,gn}$  è il fattore di utilizzazione degli apporti di energia termica [/]
- $\eta_{C,ls}$  è il fattore di utilizzazione delle dispersioni di energia termica [/]

Tramite la UNI TS 11300-2 è possibile di determinare:

1. Il fabbisogno di energia utile per la preparazione dell'acqua calda sanitaria;
2. Il fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale, per la preparazione di ACS;
3. I rendimenti e le perdite dei sottosistemi di generazione alimentati con combustibili fossili liquidi o gassosi.

Gli impianti di climatizzazione invernale, di produzione di acqua calda sanitaria e di generazione vengono divisi in due parti principali:

- Parte di utilizzazione, dal punto di consegna alla rete di distribuzione al punto di emissione dell'energia termica;
- Parte di generazione, dal punto di consegna dell'energia elettrica al confine dell'edificio al punto di consegna dell'energia termica utile alla rete di distribuzione dell'edificio.

I sottosistemi di utilizzazione si suddividono a loro volta in:

- 1) Climatizzazione invernale, che comprende i sistemi di: emissione, regolazione dell'emissione del calore in ambiente, distribuzione (circuiti primari e secondari) ed accumulo esterno a componenti di impianto;
- 2) Produzione acqua calda sanitaria, di cui fanno parte i sistemi di: erogazione, distribuzione (distribuzione finale e rete di ricircolo) ed accumulo esterno a componenti di impianto;

Per ciascun sottosistema si devono determinare:

- Il fabbisogno di energia in ingresso al sottosistema;
- l'energia ausiliaria totale richiesta;
- le perdite;
- le perdite recuperate.

Sulla base di:

- Energia utile da fornire in uscita al sottosistema
- Caratteristiche del sottosistema e condizioni di funzionamento dell'impianto

Per ogni sottosistema, identificato con il pedice x, vale il seguente bilancio termico:

$$Q_{in,x} = Q_{out,x} + (Q_{l,x} - Q_{lrh,x}) - Q_{aux,lrh,x} \quad [3]$$

Il termine  $(Q_{l,x} - Q_{lrh,x})$  corrisponde al valore delle perdite al netto delle perdite recuperate identificate con  $Q_{aux,lrh,x}$  (energia termica recuperata dagli ausiliari elettrici).

Vi sono due livelli di calcolo, quello semplificato basato su valori precalcolati contenuti in tabelle, e quello dettagliato, utilizzato per calcolare le perdite nei casi complessi o comunque quando non si rientrano nei limiti di applicazione delle tabelle. Inoltre, nel primo livello di calcolo non si considerano le perdite recuperabili.

Una volta calcolate le perdite dall'impianto fino alla distribuzione o all'accumulo compresi per il riscaldamento e per la produzione di acqua calda sanitaria, la procedura di calcolo prevede di calcolare per ciascun mese il fabbisogno di energia termica utile globale che deve essere fornito al sistema di generazione, indicato con  $Q_{gn,out}$ . Il fabbisogno che deve essere fornito dai sottosistemi di generazione all'edificio è dato da:

$$\sum Q_{HW,gn,out,i,mese} = \sum Q_{HW,d,in,j,mese} \quad [4]$$

In cui  $\sum Q_{HW,d,in,j,mese}$  è la sommatoria dei contributi di energia termica utile dei sottosistemi di generazione nel periodo calcolato. Si precisa che il calcolo dei sottosistemi di generazione si effettua mediante le procedure descritte dalla UNI TS 11300-2 se i sistemi sono costituiti da un unico sistema di generazione a combustione a fiamma o nei casi di generatori a fiamma alimentati mediante combustibili liquidi e gassosi destinati ad integrazione termica in sistemi polivalenti, mentre per tutti gli altri casi si fa riferimento alle procedure descritte dalle UNI TS 11300-4. In quest'ultimo caso, il fabbisogno di energia primaria dell'edificio  $Q_P$  per ogni servizio energetico è dato da:

$$Q_P = \sum (Q_{del,i} \cdot f_{p,del,i}) - \sum (Q_{exp,i} \cdot f_{p,exp,i}) \quad [5]$$

Dove:

$Q_{del,i}$  è l'energia fornita dal vettore energetico;

$f_{p,del,i}$  è il fattore di conversione del vettore energetico i-esimo dell'energia fornita;

$Q_{exp,i}$  è l'energia esportata dal vettore energetico;

$f_{p,exp,i}$  è il fattore di conversione del vettore energetico i-esimo dell'energia esportata;

Per quanto riguarda la determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva, si fa riferimento alla norma UNI TS 11300-3.

In particolare, il fabbisogno effettivo dell'energia termica dell'edificio per il raffrescamento è dato dalla somma del fabbisogno ideale dell'edificio e delle perdite di tutti i sottosistemi che compongono l'impianto di raffrescamento. Si ottiene così la seguente equazione:

$$Q_{Cr,k} = Q_{C,nd,k} + Q_{l,e,k} + Q_{l,rg,k} + Q_{l,d,k} + Q_{l,d,s,k} - Q_{rr,k} \quad [6]$$

In cui:

$Q_{C,nd,k}$  è il fabbisogno ideale dell'edificio per il raffrescamento;

$Q_{l,e,k}$  sono le perdite totali di emissione;

$Q_{l,rg,k}$  sono le perdite totali di regolazione;

$Q_{l,d,k}$  sono le perdite totali di distribuzione;

$Q_{l,d,s,k}$  sono le perdite totali dei serbatoi di accumulo inerziale;

$Q_{rr,k}$  è l'energia termica recuperata.

Una volta determinate tutte le grandezze necessarie, si passa al calcolo del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva mediante la seguente equazione:

$$Q_{C,p} = \sum_k Q_{aux,k} \cdot f_{p,el} + \sum_k \left[ \sum_k \frac{Q_{Cr,k,x} + Q_{v,k,x}}{\eta_{mm,k,x}} \right] \cdot f_{p,x} \quad [7]$$

Dove:

$Q_{aux,k}$  è il fabbisogno di energia elettrica per ausiliari degli impianti di climatizzazione;

$Q_v$  è il fabbisogno del trattamento;

$f_{p,el}$  è il fattore di conversione da energia elettrica ad energia primaria;

$f_{p,x}$  è il fattore di conversione ad energia primaria del vettore energetico utilizzato dal generatore;

$\eta_{mm,k}$  è il coefficiente di prestazione medio mensile del sistema di produzione di energia frigorifera.

## 1.2 Modelli di calcolo dinamici

Alla base dei software di simulazione energetica dinamica è presente un modello di calcolo fondato sulla conoscenza delle leggi fisiche che regolano il sistema oggetto di studio; fornendo opportuni dati di ingresso e le condizioni al contorno (input), si ottengono i dati di uscita (output). Oggigiorno sono presenti modelli complessi, con un grado di dettaglio molto elevato nella rappresentazione dei fenomeni fisici. Per quanto concerne gli algoritmi di calcolo utilizzati per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, è possibile fare una distinzione principale tra i modelli di calcolo fondati sulle funzioni di trasferimento e modelli ai volumi finiti. In particolare, una funzione di trasferimento è un algoritmo che lega le sollecitazioni indotte su un sistema, quali temperature e flussi termici, con la risposta del sistema stesso. Nel metodo "Transfer Function Method" (TFM) sono impiegate funzioni di trasferimento della parete (Conduction Transfer Function, CTF) per determinare il flusso termico trasmesso per conduzione all'interno delle pareti che delimitano la zona termica. Funzioni di trasferimento ambiente (Room Transfer Function, RTF) per determinare il flusso termico convettivo che deve essere trasmesso all'aria ambiente. Infine, per determinare il flusso termico da fornire all'impianto di climatizzazione, vengono utilizzate funzioni di trasferimento impianto (Space Air Transfer Function, SATF).

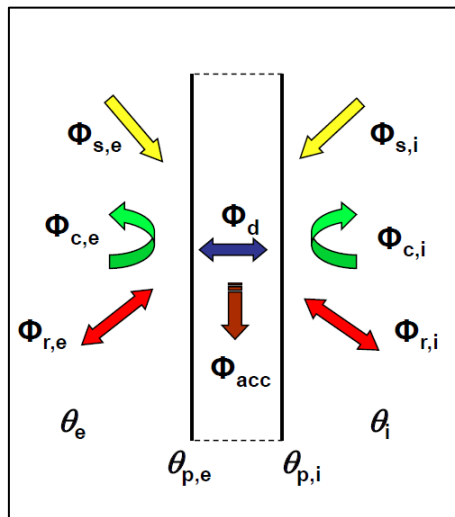
Nel software di simulazione termo-energetica EnergyPlus, al posto del metodo TFM, viene utilizzato un altro metodo, il quale si basa sulle funzioni di trasferimento CFT per la sola valutazione del flusso termico trasmesso per conduzione attraverso l'involucro in regime dinamico, mentre il bilancio termico sull'aria ambiente (Air Heat Balance, AHB), viene utilizzato per determinare il flusso termico che deve essere fornito all'ambiente per garantire il mantenimento di una determinata temperatura di set-point.

Nei metodi ai volumi finiti, invece, il sistema continuo oggetto di analisi, detto dominio, viene scomposto in un insieme di volumi di controllo, ai quali vengono applicati le equazioni di bilancio ad ognuno di essi. Aumentando il numero dei volumi di controllo si ha una soluzione più accurata: ad esempio, l'aria interna di una zona termica può essere suddivisa in molteplici porzioni di controllo per studiarne la stratificazione termica invece che considerarla come un unico volume di controllo per studiarne le proprietà quali temperatura, umidità e concentrazione di inquinante. Molto utile ad esempio per ricavare il flusso termico scambiato per conduzione attraverso un componente dell'involucro edilizio, poiché mediante questo metodo si riesce a determinare i valori di temperatura e i flussi termici in corrispondenza delle separazioni tra i volumi di controllo, che in questo caso specifico, corrispondono agli strati che costituiscono l'elemento edilizio.

### 1.2.1 L'inerzia termica e il regime sinusoidale

Come si può osservare dalla figura 1.2.1.1, la temperatura superficiale di una parete piana opaca è il risultato del bilancio tra gli scambi di calore che avvengono sulla sua superficie interna ed esterna. Sulla faccia interna della parete, infatti, sono presenti i flussi termici generati dall'irraggiamento solare ( $\phi_{s,i}$ ), dalla convezione con l'aria interna ( $\phi_{c,i}$ ), dall'irraggiamento infrarosso con le altre superfici interne, quali persone, oggetti, sorgenti di calore e altre pareti ( $\phi_{r,i}$ ), dalla conduzione all'interno degli strati che compongono la parete ( $\phi_d$ ). Analogamente, la temperatura della faccia esterna della parete è il risultato del bilancio dei flussi termici generati dall'irraggiamento solare ( $\phi_{s,e}$ ), dalla convezione con l'aria esterna ( $\phi_{c,e}$ ), dallo scambio di calore per irraggiamento con i corpi presenti all'esterno, quali suolo, edifici, cielo ed oggetti ( $\phi_{r,e}$ ) e per conduzione verso l'interno della parete ( $\phi_d$ ). Data la natura

dei materiali impiegati nell'edilizia, la velocità di trasferimento del calore è dovuta principalmente dallo scambio per conduzione. La caratteristica fisica principale legata al fenomeno conduttivo è l'inerzia termica, ovvero l'attitudine della parete a ridurre e a ritardare l'effetto delle sollecitazioni dinamico sul carico termico dell'ambiente. Nella progettazione viene presa molto in considerazione questa caratteristica, in quanto permette di mitigare le oscillazioni di temperatura nell'ambiente e soprattutto di sfasare i picchi di calore esterno dalle ore pomeridiane di massima insolazione alle ore notturne, quando tramite accorgimenti la ventilazione può aiutare a smaltire i carichi termici interni, riducendo così la richiesta di fabbisogno per la climatizzazione estiva.

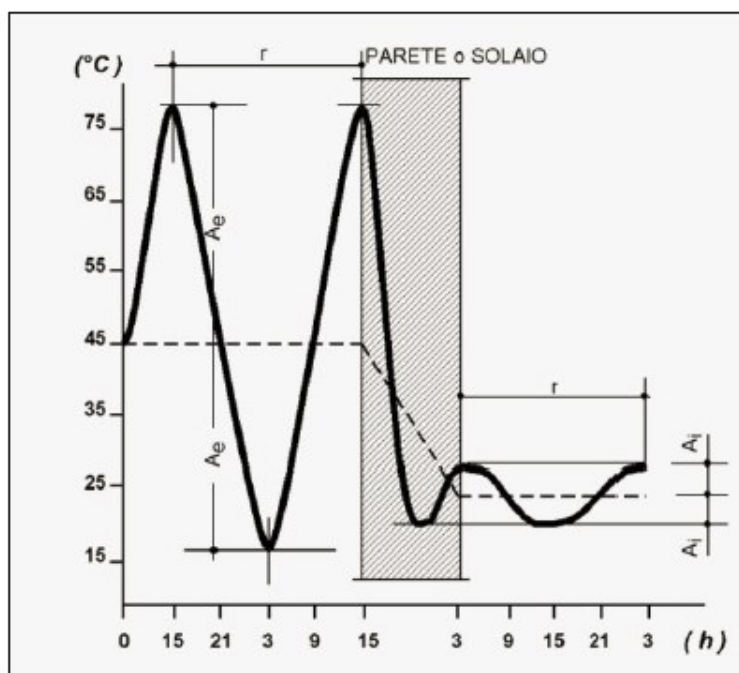


**Figura 1.2.1.1 – Scambio termico di una parete piana opaca, dispense di Termofisica, prof. Ing. Vincenzo Corrado**

Continuando ad analizzare separatamente la faccia esterna da quella interna della parete opaca, le sollecitazioni termiche che agiscono sono:

- Sul lato esterno:
  - variazione giornaliera della temperatura esterna;
  - variazione giornaliera della radiazione incidente sul componente.
- Sul lato interno:
  - radiazione solare attraverso i vetri;
  - occupazione, apporti interni;
  - intermittenza impianto di riscaldamento/raffrescamento.

La sollecitazione termica esterna è tanto più elevata quanto più è elevata l'escursione giornaliera della temperatura esterna; l'inerzia termica è legata alla capacità di accumulo del componente opaco, detta massa, ma anche allo stesso isolamento termico. Per quanto riguarda la sollecitazione termica interna, invece, aumenta con l'aumentare dell'escursione giornaliera dei carichi interni e anche in questo caso l'inerzia è legata alla massa della parete, ma dei primi dieci centimetri a contatto con l'aria interna. Gioca un ruolo fondamentale quindi anche la posizione dello strato di isolamento termico, in quanto se viene posto sul lato interno si annulla l'effetto benefico della massa della parete dei primi dieci centimetri.



**Figura 1.2.1.2 – Sfasamento “ $r$ ” ed attenuazione “ $A_{e/i}$ ” della sollecitazione termica che attraversa un componente opaco, *Guida AiCARR (7)***

A livello legislativo la normativa UNI ISO 13786 del 2008 fornisce la procedura per il calcolo del fattore di decremento, del ritardo e delle capacità termiche riferite al lato interno ed esterno della parete. Tale procedura si basa sull'ipotesi che la temperatura e i flussi termici hanno andamento sinusoidale che si attenua durante il loro passaggio attraverso la parete e subiscono uno sfasamento. Per determinare le caratteristiche termiche dinamiche la UNI 13786 esegue il prodotto di matrici fra numeri complessi. In particolare, il fattore di decremento viene calcolato come il rapporto tra il modulo della trasmittanza termica periodica e la trasmittanza in condizioni stazionarie della parete, dove la trasmittanza termica periodica è un numero complesso definito come rapporto tra l'ampiezza complessa della densità di flusso termico entrante dalla parte esterna della parete e l'ampiezza complessa della temperatura dell'aria interna. Per quanto riguarda lo sfasamento, esso viene definito come il rapporto tra l'argomento della trasmittanza termica periodica e la pulsazione della funzione sinusoidale. La norma sottolinea il fatto che il periodo delle funzioni sinusoidali influisce i risultati, ma allo stesso tempo non fornisce nessun valore di esso da adottare nei calcoli; vengono riportati solamente come periodi di tempi quelli di un'ora, un giorno, una settimana ed un anno. Un approccio analogo per il calcolo dei parametri di trasmissione termica dei componenti opachi lo si può trovare anche nell'appendice A della norma UNI 10375 del 2011.

### 1.2.2 Metodi per l'integrazione di Fourier

Per intraprendere lo studio della condizione in regime dinamico è indispensabile risolvere l'equazione di Fourier, valida per un mezzo omogeneo isotropo, con diffusività termica " $\alpha$ ", privo di generazione interna di calore:

$$\alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial T}{\partial t} \quad [8]$$

Dove la diffusività " $\alpha$ " è definita come:

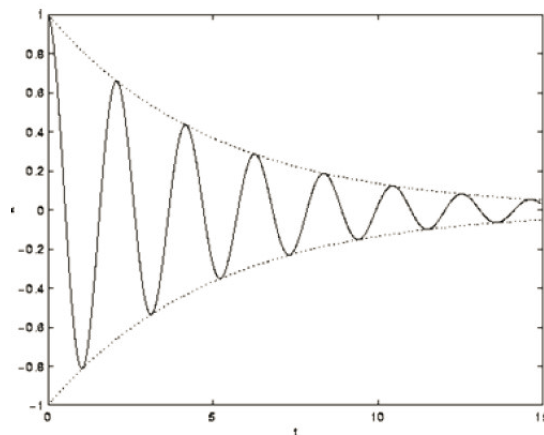
$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad [9]$$

Nell'ipotesi di flusso termico monodimensionale, che corrisponde ad una parete piana indefinita di spessore costante, l'equazione di Fourier diventa:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad [10]$$

Ipotizzando che sulla faccia esterna della parete la temperatura vari con la seguente legge della figura 1.2.2.1:

$$T_{x=0} = A \sin(\omega t) \quad [11]$$



**Figura 1.2.2.1 – andamento della temperatura sulla superficie esterna, Guida AiCARR (7)**

Dove  $\omega = \frac{2\pi}{P}$  è la pulsazione e " $P$ " è il periodo

Si ritiene opportuno ipotizzare che all'interno della parete la temperatura oscilli seguendo l'andamento del lato esterno e che l'ampiezza delle oscillazioni vada via via diminuendo man mano che si entri nell'elemento opaco. In corrispondenza della generica profondità " $x$ ", la temperatura assumerà la seguente equazione:

$$T_x = B(x) \sin(\omega t - bx) \quad [12]$$

E andando a sostituire tale valore nell'equazione di Fourier, si ottiene:

$$\frac{\partial^2 B(x)}{\partial x^2} - b^2 B(x) = 0 \quad [13]$$



$$\omega B(x) - 2\alpha b \frac{\delta B(x)}{\delta x} = 0 \quad [14]$$

L'integrale generale della prima equazione è

$$B(x) = Me^{bx} + Ne^{-bx} \quad [15]$$

Dove le quantità M ed N si ottengono ponendo le seguenti condizioni al contorno:

$$x = 0 \quad T_x = A \sin(\omega t) \quad [16]$$

$$x = \infty \quad T_x = 0 \quad [17]$$

Da cui si ottiene M=0 e B=A.

Andando a sostituire B(x) nella seconda equazione, si ottiene:

$$b = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad [18]$$

E infine si ha:

$$T_x = Ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} \sin \left( \omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x \right) \quad [19]$$

La soluzione dell'equazione di Fourier si basa su alcune ipotesi ammissibili dal punto di vista fisico, quali parete considerata piana indefinita, lo spessore costante, mezzo isotropo ed omogeneo, ma nello stesso tempo vi sono ipotesi che rispecchiano meno la realtà, come ad esempio l'assunzione dell'andamento sinusoidale della temperatura sul lato di entrata o lo spessore semi-infinito della parete. Risulta quindi essere più complesso affrontare il problema nelle ipotesi che più si avvicinano alla realtà, in cui la parete è composta da vari strati e che scambia flussi di natura radiativa e convettiva per effetto di variazioni di temperatura descritte da una qualsiasi successione di dati numerici. Tuttavia vi sono diversi metodi di integrazione in grado di risolvere questi problemi e definire l'espressione della soluzione matematica esatta, anche se ognuno di essi adotta metodi di calcolo approssimati. Tali metodi possono essere numerici o analitici. La differenza sta nell'approccio iniziale, in quanto tutti i metodi fanno uso sia di procedure analitiche che di tecniche numeriche. Le approssimazioni che influenzano i risultati finali sono l'interpolazione dei dati in ingresso e l'impossibilità pratica di determinare la soluzione esatta dell'equazione di Fourier. Riprendendo la distinzione tra metodi analitici e numerici, per quanto riguarda quelli analitici si hanno:

- metodo della trasformata di Laplace;
- metodo della Z-trasformata;
- metodo armonico.

Mentre per quanto riguarda i metodi numerici si hanno:

- metodo agli elementi finiti;
- metodo alle differenze finite (CFD).

Per quanto concerne la procedura di calcolo, i metodi analitici prevedono i seguenti step:

- a) rappresentazione dei dati di input come somma di funzioni elementari;
- b) risoluzione dell'equazione di Fourier tramite operatori matematici;
- c) individuazione delle funzioni di trasferimento dello strato termico elementare mediante la forma matriciale;
- d) calcolo delle proprietà dell'elemento opaco tramite il prodotto delle matrici contenenti le proprietà dei singoli strati di cui esso è composto;
- e) calcolo dei dati di output in corrispondenza dei dati di ingresso discreti mediante la sovrapposizione degli effetti.

I vantaggi di adottare i seguenti metodi sono i seguenti:

- ✓ eseguire il calcolo di parametri legati alla natura fisica della struttura termica;
- ✓ eseguire il calcolo dell'andamento delle grandezze di uscita in corrispondenza dei dati di input scelti nella fase iniziale;
- ✓ valutare le temperature e i flussi in ogni punto all'interno del sistema modellato.

I svantaggi sono:

- ✗ non è consentito assumere la variazione dei coefficienti di scambio termico e delle proprietà termo-fisiche dei materiali;
- ✗ non è possibile descrivere i comportamenti fisici che seguono leggi non lineari;
- ✗ non permettono di affrontare i problemi inerenti la trasmissione del calore in due o tre dimensioni.

I metodi numerici, invece, prevedono questa procedura di calcolo:

- a) discretizzazione dello spazio interessato al fenomeno propagatorio;
- b) determinazione dei legami spazio-temporali che rendono stabile la soluzione numerica;
- c) definizione locale dell'equazione di Fourier (senza l'uso di operatori matematici);
- d) generazione di un sistema di  $n$  equazioni in base al numero discretizzazioni spaziali operate;
- e) risoluzione del sistema di  $n$  equazioni mediante i metodi dell'algebra numerica.

Grazie a questi metodi invece è possibile:

- ✓ descrivere i comportamenti fisici che seguono leggi non lineari;
- ✓ esaminare la variabilità dei coefficienti di scambio termico e delle proprietà termo-fisiche dei mezzi;
- ✓ sostenere i problemi riguardanti la trasmissione del calore in due o tre dimensioni.

Allo stesso tempo, però è necessario:

- ✗ operare discretizzazioni spaziali costituite da numeri elevatissimi di intervalli;
- ✗ rispettare le limitazioni imposte dai criteri di stabilità della soluzione e questo comporta che non sempre si è in grado di valutare le temperature e i flussi in qualunque punto della struttura termica;
- ✗ eseguire l'intera procedura di calcolo, o gran parte di essa, ogni qual volta che vengono cambiate le grandezze di ingresso.

### 1.2.2.1 Metodo della trasformata di Laplace

La trasformata di Laplace è un algoritmo della soluzione delle equazioni differenziali. Sia  $f(t)$  una funzione del tempo definita per  $0 \leq t \leq \infty$ , la sua trasformata di Laplace  $F(s)$  risulta:

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad [20]$$

Le trasformate di funzioni discontinue che iniziano in un certo istante, essendo state prima nulle, sono ad esempio il “gradino unitario” e la “rampa lineare”

Nella pratica si effettuano misurazioni e i valori che si ottengono vanno a formare le funzioni di ingresso. In questo modo si ottengono delle funzioni di ingresso formate da una successione di valori numerici in corrispondenza di alcuni istanti: queste funzioni sono dette funzioni campionate e l'intervallo di tempo tra un valore e l'altro è detto intervallo di campionamento.

La prima procedura da eseguire consiste nell'interpolare i dati campionati di ingresso per riempire l'area sottesa del loro diagramma. Questa operazione risulta essere essenziale, in quanto il sistema termico presumerebbe che tra un campionamento e l'altro non ci sia alcun segnale e, poiché l'area sottesa dai soli dati campionati è nulla, anche i flussi di energia ad essa associati sarebbero nulli. Utilizzando una serie di gradini, di ampiezza pari alla differenza tra il dato attuale e quello che lo precede, si ottiene un'interpolazione formata da una gradinata crescente o decrescente a seconda dell'andamento dei dati.

L'analogo procedimento può essere effettuato per eseguire l'interpolazione lineare di dati, mediante però un treno di rampe lineari, ognuna delle quali ritardata nel tempo di un'ampiezza adeguata. In questo secondo caso, però, l'ampiezza di ogni rampa deve essere pari alla differenza tra il coefficiente angolare del tratto angolare e quello del tratto che lo precede.

Combinando in maniera opportuna i vari tipi di segnali elementari, è possibile quindi creare modi di interpolazione che impiegano impulsi rettangolari, triangolari, parabolici, ecc.

Data la funzione della temperatura  $T(x,t)$ , avente trasformata  $\theta(x,s)$ , valgono le seguenti tre proprietà:

$$\mathcal{L} \left[ \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \right] = s\theta(x,s) - T(x,s) \quad [21]$$

$$\mathcal{L} \left[ \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right] = \frac{\partial \theta(x,s)}{\partial x} \quad [22]$$

$$\mathcal{L} \left[ \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \right] = \frac{\partial^2 \theta(x,s)}{\partial x^2} \quad [23]$$

Utilizzando la trasformata di Laplace, e ipotizzando la temperatura ovunque all'istante iniziale, l'equazione di Fourier sarà:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad [24]$$

$$\frac{\partial^2 \theta(x,s)}{\partial x^2} = \frac{s}{\alpha} \theta(x,s) = 0 \quad [25]$$

L'integrale generale dell'equazione avrà la seguente forma:

$$\theta(x,s) = Me^{\beta x} + Ne^{-\beta x} \quad [26]$$

$$\text{dove } \beta = \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \quad [27]$$

Mentre il flusso termico sarà:

$$Q(x,t) = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \quad [28]$$

$$\varphi(x,s) = \mathcal{L}[Q(x,t)] = \mathcal{L}\left[-\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right] = -\lambda \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \quad [29]$$

Utilizzando l'espressione dell'integrale generale si ottiene:

$$\varphi(x,s) = -\lambda \beta (Me^{\beta x} + Ne^{-\beta x}) \quad [30]$$

Tramite le condizioni al contorno:

$$x = 0 \rightarrow \theta = \theta(0,s) = \theta_0(s) \quad \varphi = \varphi(0,s) = \varphi_0(s)$$

$$x = L \rightarrow \theta = \theta(L,s) = \theta_L(s) \quad \varphi = \varphi(L,s) = \varphi_L(s)$$

Si ottengono le relazioni:

$$\theta_L(s) = a\theta_0(s) + b\varphi_0(s) \quad [31]$$

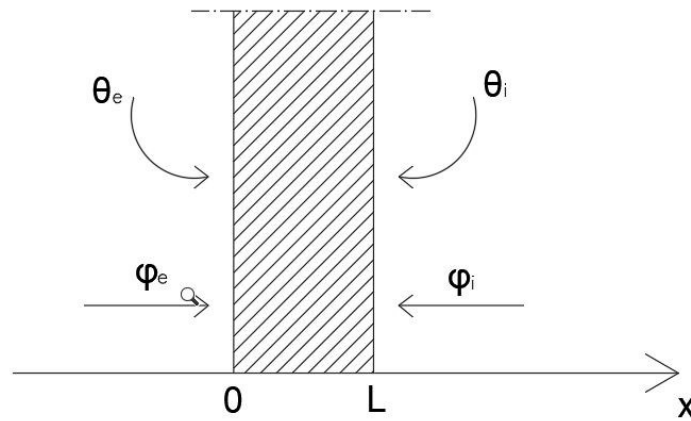
$$\varphi_L(s) = c\theta_0(s) + d\varphi_0(s) \quad [32]$$

Dove i coefficienti valgono:

$$a = \cosh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right); \quad b = -\frac{\sinh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right)}{\lambda\sqrt{\frac{s}{\alpha}}}; \quad c = -\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \sinh\left(L\sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}}\right); \quad d = \cosh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right);$$

Successivamente, definendo  $\theta_e$  e  $\varphi_e$  come le trasformate delle temperature e dei flussi sulla faccia in cui  $x=0$  e  $\theta_i$  e  $\varphi_i$  le trasformate delle temperature e dei flussi sulla faccia in cui  $x=L$ , si può definire la matrice di trasmissione dello strato  $|M|$ :

$$\begin{bmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{bmatrix} = |M| \cdot \begin{bmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{bmatrix} \quad [33]$$

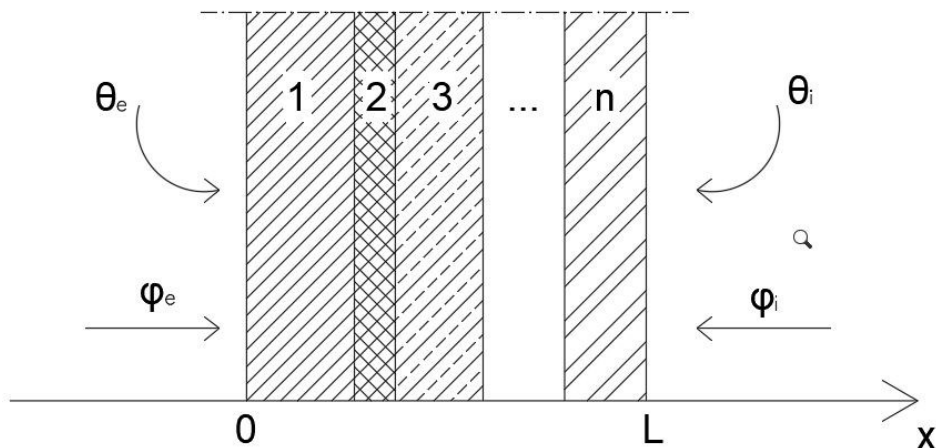


Convenzione dei segni:  $\varphi_i$  e  $\varphi_e$  positivi se orientati in direzione concorde rispetto l'asse  $x$ ;  
Per la simmetria dello strato i parametri della matrice di trasmissione godono della proprietà  $ad-bc=1$ , tramite la quale si può scrivere:

$$\begin{vmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} d & -b \\ -c & a \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{vmatrix} \quad [34]$$

Si considera ora una parete costituita da più strati, trascurando la resistenza termica di contatto tra uno strato e l'altro, la matrice di trasmissione risulta essere:

$$\begin{vmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_{n-1} & b_{n-1} \\ c_{n-1} & d_{n-1} \end{vmatrix} \cdots \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T_e \\ Q_e \end{vmatrix} = |M_p| \cdot \begin{vmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{vmatrix} \quad [35]$$



Siano  $T_i$  e  $T_e$  le temperature dei fluidi che circondano le pareti e indicando con  $R_i$  e  $R_e$  le resistenze termiche di convezione sulle facce delle pareti, si può scrivere:

$$\begin{vmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -R_i \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -R_e \\ 0 & 1 \end{vmatrix} |M_p| \begin{vmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{vmatrix} \quad [36]$$

mentre se lo strato generico è descritto mediante le relazioni

$$\begin{vmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} d & -b \\ -c & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{vmatrix} \quad [37]$$

Si ha:

$$\begin{vmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & R_e \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & R_i \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{vmatrix} \quad [38]$$

Dove la matrice di trasmissione  $|N_p|$  è stata ottenuta invertendo nel prodotto l'ordine degli strati che compongono la parete (dall'esterno verso l'interno). In generale la parete non è termicamente simmetrica, per cui risulta  $|N_p| \neq |M_p|$ . I parametri della matrice di trasmissione della parete godono della proprietà:  $AD-BC=1$ . Per trovare le soluzioni del dominio nel tempo occorre riscrivere nella forma seguente le espressioni delle trasformate di  $Q_i$  e  $Q_e$ :

$$\varphi_i = \frac{1}{B}\theta_e - \frac{A}{B}\theta_i \quad [39]$$

$$\varphi_e = \frac{D}{B}\theta_e - \frac{1}{B}\theta_i \quad [40]$$

Le grandezze che mettono in relazione le trasformate dei segnali di uscita con quelle dei segnali di ingresso sono proprie ed identificative del sistema, e sono chiamate funzioni di trasferimento. Si consideri ora il caso generale di un sistema soggetto ad un segnale di ingresso  $i(t)$  e che a sua volta emette un segnale di uscita  $u(t)$ ; siano  $I(s)$  e  $U(s)$  le relative L-trasformate, si ottiene:

$$U(s) = G(s)I(s) = \frac{N(s)}{D(s)}I(s) \quad [41]$$

In cui la funzione di trasferimento  $G(s)$  è espressa in forma di rapporto. Per la linearità del sistema, rappresentando le grandezze discrete di ingresso per mezzo di un treno di gradini o di rampe, si riesce a determinare la risposta del sistema sommando le risposte relative di ciascun segnale elementare di cui è stato formato il treno. Ora si sostituisce le trasformate del gradino e della rampa, ottenendo:

$$U_G(s) = \frac{1}{s} \frac{N(s)}{D(s)} \quad [42]$$

$$U_R(s) = \frac{1}{s^2} \frac{N(s)}{D(s)} \quad [43]$$

Sapendo quanto valgono le radici di  $D(s)$ , le risposte  $U(s)$  possono essere riscritte nella seguente forma:

$$U_G(s) = \frac{c_0}{s} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{r_i}{s+p_i} \quad [44]$$

$$U_R(s) = \frac{c_0}{s^2} + \frac{c_1}{s} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{r_i}{s+p_i} \quad [45]$$

Dove  $p_i$  è il generico polo della funzione di trasferimento, ovvero la radice del denominatore  $D(s)$ , mentre  $C_0$  e  $C_1$  sono i residui dei poli di origine di molteplicità singola o doppia. Poiché i coefficienti della matrice di trasmissione sono di natura trascendenti, le radici delle funzioni di trasferimento sono in numero infinito e si trovano tutte sulla parte negativa dell'asse reale e, applicando le regole per anti trasformate, si ottiene:

$$u_G(t) = C_0 + \sum_{i=1}^{\infty} r_i e^{-p_i t} \quad [46]$$

$$u_R(t) = C_0 t + C_1 \sum_{i=1}^{\infty} r_i e^{-p_i t} \quad [47]$$

Le risposte a gradini/rampe di ampiezza non unitaria, si ottengono moltiplicando le equazioni [43] e [44] per le rispettive ampiezze dei segnali. Le radici del denominatore della funzione di trasferimento si possono ricavare mediante un metodo iterativo tramite il calcolo automatico. Per procedere occorre mettere nei coefficienti della matrice  $\sqrt{s} = j\delta$  per trasformarle in funzioni reali della variabile reale  $\delta$ . Per quanto concerne i poli, essi sono propri della struttura termica oggetto di studio ed indipendenti dal segnale di ingresso, poiché sono le radici del denominatore della sola funzione di trasferimento. Per determinare i residui per il gradino, si procede in questa maniera:

$$C_0 = \left[ \frac{N(s)}{D(s)} \right]_{s=0} \quad r_i = \left[ \frac{N(s)}{s D'(s)} \right]_{s=-p_i} \quad [48]$$

Mentre nel caso della rampa, i relativi residui si calcolano nel seguente modo:

$$C_0 = \left[ \frac{N(s)}{D(s)} \right]_{s=0} \quad C_1 = \left[ \frac{N'(s)D(s) - N(s)D'(s)}{D(s)^2} \right]_{s=0} \quad r_i = \left[ \frac{N(s)}{s^2 D'(s)} \right]_{s=-p_i} \quad [49]$$

$$\text{I cui } D'(s) = \frac{dD(s)}{ds} \quad \text{e} \quad N'(s) = \frac{dN(s)}{ds}$$

Se si osservano le risposte temporali ai segnali elementari si può notare che, dovendo essere nulle all'istante iniziale in cui  $t=0$ , devono valere le seguenti equazioni:

$$u_G(0) = C_0 + \sum_{i=1}^{\infty} r_i = 0 \quad [50]$$

$$u_R(t) = C_1 + \sum_{i=1}^{\infty} r_i = 0 \quad [51]$$

Dato che è possibile adoperare solo  $N_i$  degli infiniti poli, in generale vale:

$$u_G(0) = C_0 + \sum_{i=1}^{\infty} r_i \neq 0 \quad [52]$$

$$u_R(t) = C_1 + \sum_{i=1}^{\infty} r_i \neq 0 \quad [53]$$

Questo genera uno scarto costante nella risposta che si propaga dall'istante iniziale su tutto il treno di risposte elementari. In particolare, lo scarto all'inizio tende a ridursi velocemente all'aumentare del numero dei poli, dopodiché tende ad attenuarsi lentamente anche aumentando notevolmente  $N_i$ . Nella pratica questo genera un problema nel decidere quanti poli utilizzare e si è costretti a sceglierne alcune centinaia, se non addirittura migliaia. Per

elidere lo scarto e dare un senso fisico alla risposta, la quale sarebbe invece nulla all'istante iniziale, è opportuno determinare i residui. Nello specifico, nel caso dei treni di gradini i residui si calcolano nel seguente modo:

$$C_0 = -\sum_{i=1}^{\infty} r_i \quad [54]$$

Mentre nel secondo caso della rampa nel seguente modo:

$$C_1 = -\sum_{i=1}^{\infty} r_i \quad [55]$$

La risposta della parete ai vari istanti di calcolo risulta essere:

$$u(0) = 0$$

$$u(\Delta) = u_1(t)_{t=\Delta}$$

$$u(2\Delta) = u_1(t)_{t=2\Delta} + u_2(t)_{t=\Delta}$$

$$u(n\Delta) = u_1(t)_{t=n\Delta} + u_2(t)_{t=(n-1)\Delta} + \dots + u_{n-1}(t)_{t=2\Delta} + u_n(t)_{t=\Delta} \quad [56]$$

E valendo per il gradino:

$$u_m(t)_{t=n\Delta} = i_m [C_0 + \sum_{i=1}^{N_i} r_i e^{-p_i n\Delta}] \quad [57]$$

$$i_m = i[m\Delta] - i[(m-1)\Delta] \quad [58]$$

In cui il valore  $i[m\Delta]$  corrisponde al valore del segnale di ingresso all'istante  $m\Delta$ .

Per la rampa, invece, la risposta della parete ai vari istanti di calcolo è:

$$u_m(t)_{t=n\Delta} = I_m [C_0 n\Delta + C_1 + \sum_{i=1}^{N_i} r_i e^{-p_i n\Delta}] \quad [59]$$

$$i_m = \frac{i[m\Delta] - 2i[(m-1)\Delta] + i[(m-2)\Delta]}{\Delta} \quad [60]$$

All'aumentare del tempo, quindi, il calcolo dell'uscita diviene sempre più complesso a causa dell'annidarsi di sommatorie, ognuna delle quali contiene centinaia di valori. Per questi motivi tale metodo ha avuto scarse applicazioni pratiche, ma è servito comunque perché è stato la base per lo sviluppo del metodo della Z-trasformata.

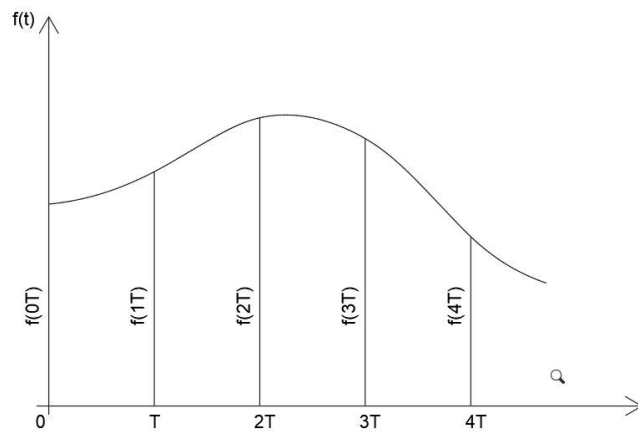
### 1.2.2.2 Metodo della Z-trasformata

Sia  $f(t)$  una funzione definita per  $t \geq 0$ , di cui sono noti i valori  $f(n\Delta)$  relativi ad un campionamento di intervallo temporale  $\Delta$ , la Z-trasformata risulta essere:

$$Z[f(t)] = F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f(n\Delta) z^{-n} = f(0) + f(\Delta) z^{-1} + f(2\Delta) z^{-2} + f(3\Delta) z^{-3} + \dots \quad [61]$$

In cui  $z$  è una variabile complessa.





**Figura 1.2.2.2.1 – Z-trasformata,**

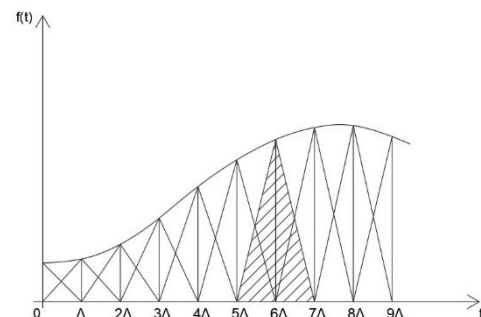
Vengono impiegate le Z-trasformate delle seguenti funzioni:

$$f(t) = u(t) \quad F(z) = \frac{1}{1-z^{-1}} \quad F(s) = \frac{1}{s} \quad [62]$$

$$f(t) = t \quad F(z) = \frac{\Delta}{z(1-z^{-1})^2} \quad F(s) = \frac{1}{s^2} \quad [63]$$

$$f(t) = e^{-at} \quad F(z) = \frac{1}{1-e^{-a\Delta}z^{-1}} \quad F(s) = \frac{1}{s+a} \quad [64]$$

Si tratta di una procedura di calcolo anomala dal punto di vista matematico, in quanto non viene utilizzato l'interpolatore, cioè un generatore di impulsi di varie forme che svolge la mansione di ricostruzione della funzione di ingresso campionata. Tale procedura è quella ideata da Mitalas, il quale propone un metodo più semplificato per il caso di impulsi triangolari. Mitalas propone infatti di utilizzare una sola rampa anziché tre sfalsate nel tempo per consentire una interpolazione lineare del segnale in ingresso.



**Figura 1.2.2.2.2 – Z-trasformata. impulsi triangolari**

Dato il dominio della L-trasformata, quando un sistema con funzione di trasferimento  $G(s)$  è soggetto a sollecitazioni generate da un segnale di ingresso  $I(s)$ , esso produce un'uscita che risulta essere pari a:

$$O(s) = I(s)G(s) \quad [65]$$

Prendendo in considerazione il dominio della Z-trasformata, invece, tale relazione è scritta così:

$$H(z) = \frac{O(z)}{I(z)} = \frac{z[O(s)]}{z[I(s)]} = \frac{z[I(s)G(s)]}{z[I(s)]} \quad [66]$$

Mentre  $G(s)$  dipende dalle proprietà del sistema,  $H(z)$  dipende anche dal segnale di ingresso. Questo comporta che nel dominio della Z-trasformata lo stesso sistema può avere una diversa funzione di trasferimento per ognuno dei segnali di ingresso utilizzati. Si è visto in precedenza che un sistema sottoposto a sollecitazioni da una rampa lineare ha una risposta del tipo:

$$O(s) = I(s)G(s) = \frac{C_0}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{s+p_i} \quad [67]$$

Sostituendo i valori, nel caso del dominio della Z-trasformata diventa:

$$O(z) = \frac{C_0\Delta}{z(1-z^{-1})^2} + \frac{C_1}{(1-z^{-1})} + \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{1-e^{-p_i\Delta}z^{-1}} \quad [68]$$

Quindi:

$$H(z) = \frac{O(z)}{I(z)} = \frac{z[I(s)G(s)]}{z[I(s)]} = \frac{1}{\frac{\Delta}{z(1-z^{-1})^2}} \left[ \frac{C_0\Delta}{z(1-z^{-1})^2} + \frac{C_1}{(1-z^{-1})} + \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{1-e^{-p_i\Delta}z^{-1}} \right] \quad [69]$$

Ovvero:

$$H(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = C_0 = \frac{1}{\Delta} z(1-z^{-1}) \left[ C_1 + (1-z^{-1}) + \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{1-e^{-p_i\Delta}z^{-1}} \right] \quad [70]$$

Dalla quale si ottiene:

$$D(z) = \prod_{i=1}^N (1 - e^{-p_i\Delta}z^{-1}) = d_0 + d_1z^{-1} + d_2z^{-2} + \dots + d_Nz^{-N} \quad [71]$$

Dove, per  $h_n = e^{-p_i\Delta}z^{-1}$  si ricava:

$$d_0 = 1$$

$$d_1 = -[h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_N]$$

$$d_2 = -[h_1h_2 + h_1h_3 + \dots + h_2h_3 + h_2h_4 + \dots + h_{N-1}h_N]$$

$$d_3 = -[h_1h_2h_3 + h_1h_2h_4 + \dots + h_2h_3h_4 + h_2h_3h_5 + \dots + h_{N-2}h_{N-1}h_N]$$

$$d_N = (-1)^N [h_1h_2h_3h_4 \dots h_N]$$

e dato che:

$$H(z) = \frac{O(z)}{I(z)} = \frac{N(z)}{D(z)} \quad [72]$$

Si ha:

$$N(z) = \frac{D(z)}{I(z)} O(z) \quad [73]$$

In cui  $O(z)$  può essere ricavato utilizzando la risposta temporale  $O(t)$  del sistema, già determinata tramite l'anti trasformata di Laplace. Per cui si avrà:

$$O(z) = o_0 + o_1z^{-1} + o_2z^{-2} + \dots + o_Nz^{-N} \quad [74]$$

In cui:

$$o_0 = O(t)_{t=0} = 0$$

$$o_1 = O(t)_{t=\Delta} = C_1 + C_0\Delta + \sum_{i=1}^N r_i e^{-pi\Delta}$$

$$o_2 = O(t)_{t=2\Delta} = C_1 + 2C_0\Delta + \sum_{i=1}^N r_i e^{-pi2\Delta}$$

$$o_n = O(t)_{t=n\Delta} = C_1 + nC_0\Delta + \sum_{i=1}^N r_i e^{-pin\Delta}$$

Andando a sostituire nell'espressione del numeratore si ricava:

$$N(z) = \frac{D(z)}{I(z)} O(z) \quad [75]$$

$$N(z) \frac{1}{\frac{\Delta}{z(1-z^{-1})}} (1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_N z^{-N}) (o_0 + o_1 z^{-1} + o_2 z^{-2} + \dots + o_N z^{-N}) \quad [76]$$

La quale sviluppata e riordinata diviene:

$$N(z) = n_0 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2} + \dots + n_N z^{-N} + n_{N+1} z^{-N+1} \quad [77]$$

Per quanto riguarda la funzione di trasferimento, invece, prende la forma del rapporto di polinomi:

$$H(z) = \frac{n_0 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2} + \dots + n_{N+1} z^{-N+1}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_N z^{-N}} \quad [78]$$

Nel caso in esame i coefficienti del numeratore e del denominatore tendono ad attenuarsi molto velocemente al crescere del loro ordine, a differenza di quanto visto nel caso della trasformata di Laplace. Questo comporta nel lato pratico, il vantaggio di utilizzarne solamente una decina.

Analogamente a quanto visto per la L-trasformata, si può scrivere anche in questo caso:

$$Q_e(z) = \frac{D(z)}{B(z)} T_e(z) - \frac{1}{B(z)} T_i(z) \quad [79]$$

$$Q_i(z) = \frac{1}{B(z)} T_e(z) - \frac{A(z)}{B(z)} T_i(z) \quad [80]$$

Dove le funzioni di trasferimento si determinano utilizzando il medesimo procedimento visto per le funzioni di trasferimento espresse nel dominio della variabile di Laplace.

$$\frac{D(z)}{B(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + \dots}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + \dots} \quad [81]$$

$$\frac{1}{B(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + \dots}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + \dots} \quad [82]$$

$$\frac{A(z)}{B(z)} = \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3} + \dots}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + \dots} \quad [83]$$

Dopodiché, sostituendo le seguenti equazioni:

$$T_i(z) = T_i(0) + T_i(\Delta)z^{-1} + T_i(2\Delta)z^{-2} + T_i(3\Delta)z^{-3} + \dots \quad [84]$$

$$Q_i(z) = Q_i(0) + Q_i(\Delta)z^{-1} + Q_i(2\Delta)z^{-2} + Q_i(3\Delta)z^{-3} + \dots \quad [85]$$

$$T_e(z) = T_e(0) + T_e(\Delta)z^{-1} + T_e(2\Delta)z^{-2} + T_e(3\Delta)z^{-3} + \dots \quad [86]$$

$$Q_e(z) = Q_e(0) + Q_e(\Delta)z^{-1} + Q_e(2\Delta)z^{-2} + Q_e(3\Delta)z^{-3} + \dots \quad [87]$$

Ed essendo:

$$B_n = \sum_{j=0}^n b_j T_e[(n-j)\Delta] C_n = \sum_{j=0}^n c_j T_i[(n-j)\Delta] D_n = \sum_{j=0}^n d_j Q_i[(n-j)\Delta] \quad [88]$$

Il flusso di calore può essere ricavato con la seguente formula:

$$Q_i(n\Delta) = B_n + D_n + C_n \sum_{j=0}^n b_j T_e[(n-j)\Delta] + \sum_{j=0}^n c_j T_i[(n-j)\Delta] + \sum_{j=0}^n d_j Q_i[(n-j)\Delta] \quad [89]$$

Dove sono noti sia le temperature fino all'istante  $n\Delta$ , che il flusso di calore sul lato interno fino all'istante  $(n-1)\Delta$ . L'equazione [84] è riportata nel manuale ASHRAE Fundamentals.

Concludendo, mediante il metodo della Z-trasformata è possibile ricavare i coefficienti delle funzioni di trasferimento in un primo momento, e successivamente è possibile costruire il segnale di uscita legato all'andamento dei dati di ingresso. Questo procedimento è valido però solo se tutti i parametri termo-fisici rimangono invariati nel tempo. A differenza di quanto visto nella soluzione di Laplace, inoltre, in questo metodo l'output risulta essere una funzione discreta nota solo in corrispondenza degli attimi in cui sono stati eseguiti i campionamenti. L'ampiezza dell'intervallo di campionamento modifica in modo significativo i valori dei coefficienti delle funzioni di trasferimento. Nello specifico, se si aumenta l'ampiezza dell'intervallo di campionamento, il numero dei coefficienti da utilizzare si possono ridurre. Occorre tenere presente, però, che tanto è più alta l'inerzia termica della struttura studiata, tanto sarà maggiore il numero di coefficienti da impiegare; utilizzando un numero di coefficienti non adeguato tale metodo porta infatti a dei risultati affetti da errori inaccettabili. Viceversa, utilizzando un numero eccessivo di coefficienti, la procedura iterativa per la determinazione della risposta del sistema, costituito dalle equazioni [12] e [13], si appesantirebbe troppo. Per questi motivi occorre una certa cura e maestranza nello scegliere il numero dei coefficienti.

### 1.2.2.3 Metodo armonico

In questo metodo le grandezze di ingresso sono periodiche. Nella tecnica progettuale questo non rappresenta un limite, in quanto nella fase di dimensionamento degli impianti di climatizzazione normalmente si fa riferimento ad un giorno tipo e si ipotizza che questo si ripeta uguale durante tutto il mese considerato. Data una funzione periodica, avente periodo  $P$ , si può svilupparla in serie di Fourier:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \sin\left(\frac{2n\pi}{P}t\right) + b_n \cos\left(\frac{2n\pi}{P}t\right) \right] \quad [90]$$

cui i coefficienti della serie finita di Fourier vengono determinati mediante le seguenti formule:

$$A_0 = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left[ F \left( \frac{kP}{N} \right) \right] \quad [91]$$

$$A_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left[ F \left( \frac{kP}{N} \right) \cos \left( \frac{2\pi kn}{N} \right) \right] \quad [92]$$

$$B_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left[ F \left( \frac{kP}{N} \right) \sin \left( \frac{2\pi kn}{N} \right) \right] \quad [93]$$

La funzione periodica può essere espressa mediante la seguente forma:

$$F(t) \cong \frac{A_0}{2} \sum_{n=1}^{N/2} [\bar{F}_n \sin(n\omega t + \varphi_n)] \quad [94]$$

In cui

$$F(t) = \frac{A_n}{\sin(\varphi_n)} = \frac{B_n}{\cos(\varphi_n)} \varphi_n = \arctg \left( \frac{A_n}{B_n} \right) \quad \text{mentre} \quad \omega = \frac{2\pi}{P}$$

Per la sovrapposizione degli effetti, lo studio del problema può essere ricondotto allo studio in regime sinusoidale. In questo modo l'equazione di Fourier può essere risolta tramite l'operatore  $e^{j\omega t}$ . Questa procedura implica la supposizione che per ogni generica armonica di pulsazione  $\omega$ , il segnale di ingresso corrisponda alla parte immaginaria del più generale segnale:

$$\theta_0 = \bar{\theta}_0 [\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)] = \bar{\theta}_0 e^{j\omega t} \quad [95]$$

Il quale, durante la propagazione, verrà attenuato e sfasato divenendo:

$$\theta = A(x) [\cos(\omega t - bx) + j \sin(\omega t - bx)] = A(x) e^{j(\omega t - bx)} \quad [96]$$

E dato che

$$\frac{d\theta}{dt} = j\omega A(x) e^{j(\omega t - bx)} = j\omega \theta \quad [97]$$

Di conseguenza l'equazione di Fourier si può scrivere nella forma:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{j\omega}{\alpha} \theta = 0 \quad [98]$$

Il cui integrale generale è:

$$\theta = M e^{\beta x} + N e^{-\beta x} \quad [99]$$

$$\text{Dove } \beta = \sqrt{j\omega/\alpha}$$

Il flusso termico risulta essere:

$$Q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\lambda \beta (M e^{\beta x} + N e^{-\beta x}) \quad [100]$$

E ponendo le condizioni al contorno:

$$x = 0 \quad \theta = \overline{\theta}_0 e^{j\omega t} \quad Q = \overline{Q}_0 e^{j\omega t} \quad [101]$$

$$x = L \quad \theta = \overline{\theta}_L e^{j\omega t} \quad Q = \overline{Q}_L e^{j\omega t} \quad [102]$$

Si ottengono le seguenti relazioni:

$$\overline{\theta}_L e^{j\omega t} = [a \overline{\theta}_0 + b \overline{Q}_0] e^{j\omega t} \quad [103]$$

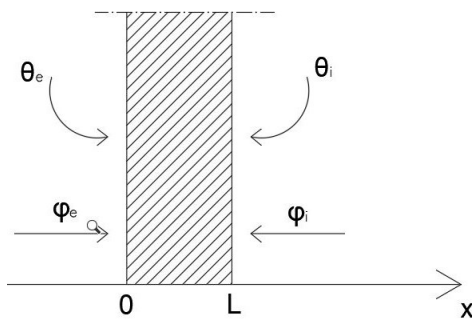
$$\overline{Q}_L e^{j\omega t} = [c \overline{\theta}_0 + d \overline{Q}_0] e^{j\omega t} \quad [104]$$

Dove il termine  $e^{j\omega t}$  si può semplificare, senza dimenticare però che è sempre parte integrante dei segnali. Per quanto riguarda i coefficienti utilizzati fino ad ora, sono analoghi a quelli visti nel metodo della trasformata di Laplace e valgono:

$$a = \cosh\left(L \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}}\right); \quad b = -\frac{\sinh\left(L \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}}\right)}{\lambda \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}}}; \quad c = -\lambda \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}} \sinh\left(L \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}}\right); \quad d = \cosh\left(L \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}}\right);$$

Ora, siano  $T_e$  e  $Q_e$  le temperature ed i flussi sul lato in cui  $x=0$ , e  $T_i$  e  $Q_i$  le temperature ed i flussi sul lato in cui  $x=L$ , si scrive:

$$\begin{bmatrix} T_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_e \\ Q_e \end{bmatrix} = |M| \cdot \begin{bmatrix} T_e \\ Q_e \end{bmatrix} \quad [105]$$



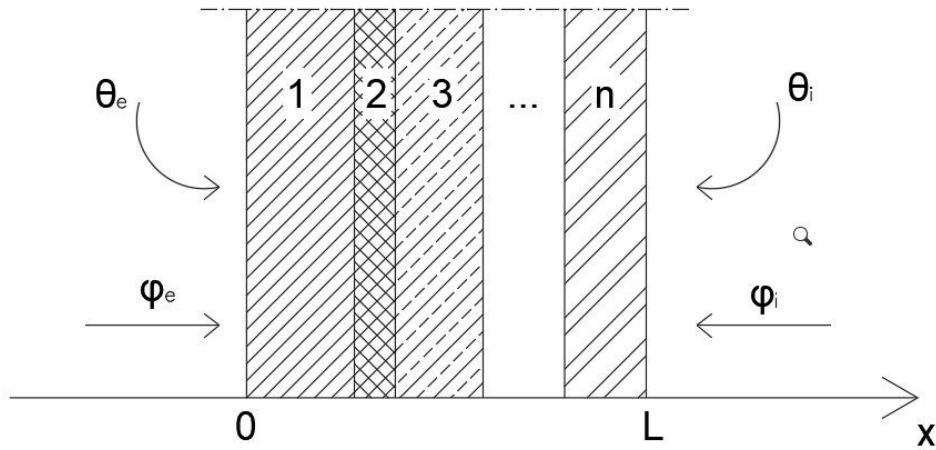
In cui  $|M|$  è la matrice di trasmissione dello strato. Convenzione dei segni:  $Q_i$  e  $Q_e$  positivi se orientati in direzione concorde rispetto l'asse  $x$ ;

Si osserva che se si sostituisce  $\sqrt{j} = \frac{i+j}{\sqrt{2}}$  i coefficienti assumono la forma con la quale sono rappresentati nella norma UNI EN ISO 13786.

Per la simmetria dello strato i parametri della matrice di trasmissione godono della proprietà  $ad-bc=1$ , tramite la quale si può scrivere:

$$\begin{bmatrix} T_e \\ Q_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_i \\ Q_i \end{bmatrix} \quad [106]$$

Utilizzando anche qui la convenzione dei segni visti per  $Q_i$  e  $Q_e$ .



Si considera ora una parete costituita da più strati, trascurando la resistenza termica di contatto tra uno strato e l'altro, la matrice di trasmissione risulta essere:

$$\begin{bmatrix} T_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{n-1} & b_{n-1} \\ c_{n-1} & d_{n-1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_e \\ Q_e \end{bmatrix} = |M_p| \cdot \begin{bmatrix} T_e \\ Q_e \end{bmatrix} \quad [107]$$

Siano  $T_i$  e  $T_e$  le temperature dei fluidi che circondano le pareti e siano  $R_i$  e  $R_e$  le resistenze termiche di convezione sulle facce delle pareti, si può scrivere:

$$\begin{bmatrix} T_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -R_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} |M_p| \begin{bmatrix} 1 & -R_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_e \\ Q_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ Q_i \end{bmatrix} \quad [108]$$

mentre se lo strato generico è descritto mediante le relazioni

$$\begin{bmatrix} T_e \\ Q_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ Q_i \end{bmatrix} \quad [109]$$

Si avrà:

$$\begin{bmatrix} T_e \\ Q_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} |N_p| \begin{bmatrix} 1 & R_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ Q_i \end{bmatrix} \quad [110]$$

Dove la matrice di trasmissione  $|N_p|$  è stata ottenuta invertendo nel prodotto l'ordine degli strati che compongono la parete (dall'esterno verso l'interno). In generale la parete non è termicamente simmetrica, per cui risulta  $|N_p| \neq |M_p|$ . I parametri della matrice di trasmissione della parete godono della proprietà:  $AD - BC = 1$ . Per le ipotesi adottate, i segnali di ingresso sinusoidali, relativi alle varie armoniche:

$$\theta = \bar{\theta} \sin(\omega t + \varphi) = \bar{\theta} e^{j(\omega t + \varphi)} \quad [111]$$

è necessario pensarli come la parte immaginaria di:

$$\theta = \bar{\theta} [\cos(\omega t + \varphi) j \sin(\omega t + \varphi)] = \bar{\theta} [\cos(\varphi) j \sin(\varphi)] e^{j\omega t} \quad [112]$$

Si nota che considerando  $\theta$  come un numero complesso, il termine  $e^{j\omega t}$  può essere trascurato nei calcoli. Dopo aver ricavato il segnale di uscita  $\gamma$ , espresso anche questo mediante numero complesso:

$$\gamma = a + jb = \sqrt{a^2 + b^2} [\cos(\psi) + j\sin(\psi)] = \bar{\gamma}[\cos(\psi) + j\sin(\psi)] \quad [113]$$

Dove

$$\bar{\gamma} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{e} \quad \psi = \text{artg}\left(\frac{b}{a}\right)$$

Ora occorre moltiplicare di nuovo il segnale di uscita  $\gamma$  per  $e^{j\omega t}$ , ottenendo:

$$\gamma e^{j\omega t} = \bar{\gamma}[\cos(\psi) + j\sin(\psi)]e^{j\omega t} = \bar{\gamma}[\cos(j\omega t + \psi) + j\sin(j\omega t + \psi)] \quad [114]$$

Di questa espressione va considerata solo la parte immaginaria, in quanto costituisce la soluzione per la generica armonica di pulsazione  $\omega$ . Infine, eseguendo la somma delle risposte ricavate per le diverse armoniche, ed aggiungendo il termine corrispondente alla componente di pulsazione nulla, riferite alle condizioni stazionarie, si ricava la risposta al segnale di ingresso di cui è stata eseguita la composizione nella serie finita di Fourier [15] sotto riportata:

$$\omega B(x) - 2\alpha b \frac{\delta B(x)}{\delta x} = 0$$

Dopo aver trattato i metodi analitici di integrazione dell'equazione di Fourier, si procede con i metodi numerici: metodo agli elementi finiti e metodo alle differenze finite (CFD).

#### 1.2.2.4 Metodo agli elementi finiti

Il seguente metodo numerico è fondato su una tecnica di risoluzione delle equazioni differenziali nota come metodo dei residui pesati. Data un'equazione differenziale come quella di Fourier:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad [115]$$

Nell'istante generico  $t$ , tale equazione risulta verificata, lungo tutto lo strati di spessore  $L$ , ponendo  $T(x,t)$  la sua soluzione esatta  $T^*$ . Tale equazione presenta in questo caso un residuo  $R(T^*, x)$  nullo:

$$R(T^*, x) = \frac{\partial T^*}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} = 0 \quad [116]$$

Per una soluzione approssimata  $T \neq T^*$  invece sarà sempre:

$$R(T, x) = \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \neq 0 \quad [117]$$

Si cerca quindi la funzione  $W(x)$ , correttiva della soluzione approssimata  $T$ , in grado di minimizzare il residuo lungo tutto il campo di esistenza della soluzione che si intende cercare:

$$\int_0^L W(x) R(T, x) dx = 0 \quad [118]$$



Nel dettaglio  $W(x)$  prende il nome di peso e l'integrale dovrà risultare pari a zero per qualsiasi istante  $t$ . Per la soluzione approssimata viene utilizzata la seguente espressione:

$$T(x, t) = \sum_{i=1}^{n+1} a_i(t) \phi_i(x) \quad [119]$$

Si procede suddividendo lo spessore  $L$  in  $n$  elementi finiti di estremi  $x_i$  e  $x_{i+1}$  definiti in un sistema di coordinate fisso.

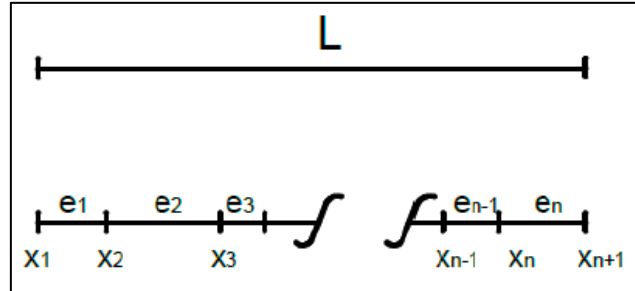


Figura 1.2.2.4.1 – suddivisione dello spessore  $L$  in elementi finiti

Si ipotizza ora che siano noti, ad un certo istante  $t$ , i valori della temperatura all'estremità di ogni elemento, in modo tale da costruire mediante interpolazione la soluzione approssimata di  $T(x, t)$  all'interno del generico elemento  $e_i$ . Giunti a questo punto sono possibili tutti i tipi di interpolazione; per semplicità si sceglie di procedere mediante interpolazione lineare del tipo:

$$T(x, t) = \alpha_1 + \alpha_2 x \quad [120]$$

Dove i coefficienti  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  variano con l'elemento.

Dato un generico elemento  $e_i$ , delimitato agli estremi dalle sue temperature  $T_1$  e  $T_2$ , si esegue l'interpolazione lineare mediante la seguente espressione:

$$T_i(x, t) = N_1(x)T_1(t) + N_2(x)T_2(t) \quad [121]$$

Se la variabile  $x$  è definita solo all'interno dell'elemento di lunghezza  $d_i$ , si ha:

$$N_1(x) = 1 - \frac{x}{d_i} \quad N_2(x) = \frac{x}{d_i} \quad [122]$$

Ogni  $T_x(x, t)$  è definita e risulta essere diversa da zero solo all'interno del proprio elemento  $e_i$ . Si assume pertanto come soluzione approssimata la seguente forma:

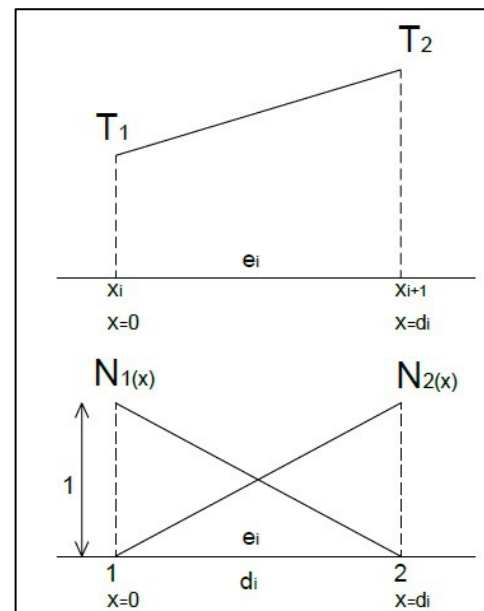


Figura 1.2.2.4.2 – interpolazione lineare di un generico elemento  $e_i$

$$T(x, t) = \sum_{i=1}^n T_i(x, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{i+1} N_k(x) T_k(t) \quad [123]$$

Per annullare l'integrale del residuo pesato, si procede suddividendo l'integrale nelle parti che corrispondono ai vari elementi  $e_i$ . Così facendo, si impone ad ogni integrale elementare di azzerarsi.

Poiché si sta eseguendo un'integrazione prendendo in riferimento il singolo elemento, si ritiene utile rappresentare  $T_i(x,t)$  utilizzando un sistema di riferimento, detto locale naturale, al quale si può passare mediante la seguente relazione:

$$x = \frac{1}{2}(1 - \xi)x_i + \frac{1}{2}(1 + \xi)x_{i+1} \quad [124]$$

In cui

$$N_1(\xi) = \frac{1}{2}(1 - \xi)$$

$$N_2(\xi) = \frac{1}{2}(1 + \xi)$$

Proseguendo con l'integrazione del residuo pesato, si ottiene:

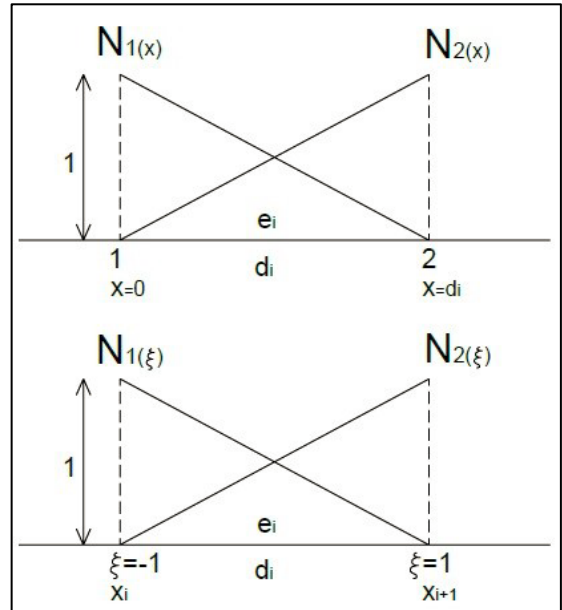


Figura 1.2.2.4.3 – interpolazione lineare di un generico elemento  $e_i$

$$\int_0^L W(x) R(T, x) dx = \int_0^L W(x) \left[ \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] dx = \int_0^L W(x) \frac{\partial T}{\partial t} dx - \int_0^L \alpha W(x) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx = 0 \quad [125]$$

Dove, risolvendo per parti l'ultimo integrale ottenuto, si ricava:

$$-\int_0^L f(x) g(x) dx = \int_0^L f'(x) g(x) dx - [f(x) g(x)]_0^L \quad [126]$$

$$\text{In cui } f(x) = W(x) \text{ e } g(x) = \frac{\partial T}{\partial x}$$

Si ricava:

$$\int_0^L W(x) R(T, x) dx = \int_0^L W(x) \frac{\partial T}{\partial t} dx + \int_0^L \alpha \frac{\partial W(x)}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} dx - \left[ \alpha W(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right]_0^L \quad [127]$$

La presente espressione è chiamata espressione debole del problema in quanto contiene solamente derivate prime. Per semplicità si riscrive tale espressione del seguente modo:

$$\int_0^L W(x) R(T, x) dx = P_1 + P_2 + P_3 = 0 \quad [128]$$

In cui  $P_1, P_2$  e  $P_3$  rappresentano le parti che costituiscono il secondo membro. Successivamente si passa al calcolo degli integrali spezzando l'intervallo  $(0, L)$  in corrispondenza degli  $n$  elementi  $e_i$ , andando a porre l'uguaglianza a zero in tutti i sotto intervalli in cui è stato scomposto l'intervallo  $(0, L)$ . Ne deriva che per ogni intervallo  $1 \leq i \leq n$  si ha:

$$\int_0^L W(x) R(T, x) dx = P_1^i + P_2^i + P_3^i = 0 \quad [129]$$

Dato che si integra solamente all'interno di ogni elemento, è possibile sostituire alla [118] la seguente espressione:

$$T(x, t) = \sum_{k=i}^{i+1} N_k(x) T_k(t) = N_i(x)T_i(t) + N_{i+1}(x)T_{i+1}(t) \quad [130]$$

Essa è l'unica espressione diversa da zero all'interno del generico elemento  $e_i$ . Per l'arbitrarietà della scelta della funzione  $W(x)$ , viene impostato per ciascun elemento:

$$W(x) = N_i(x) \quad \text{e} \quad W(x) = N_{i+1}(x) \quad [131]$$

Quindi per ogni elemento  $e_i$  si devono verificare queste due relazioni:

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} N_i(x) R(T, x) dx = P_1^i + P_2^i + P_3^i = 0 \quad [132]$$

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} N_{i+1}(x) R(T, x) dx = P_1^i + P_2^i + P_3^i = 0 \quad [133]$$

Questo genera un numero di equazioni pari a  $2n$  che si dovranno annullare tutte nel medesimo istante. Si sviluppa ora la prima parte  $P_1^i$  dell'integrale residuo pesato, per poi passare al sistema locale naturale:

$$P_1^i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \alpha \frac{dN_j(x)}{dx} \frac{d}{dx} \left[ \sum_{k=1}^{i+1} N_k(x) T_k(t) \right] dx = \frac{2\alpha}{d_i} \int_{-1}^1 \frac{dN_j(\xi)}{d\xi} \frac{d}{d\xi} \left[ \sum_{k=1}^{i+1} N_k(\xi) T_k(t) \right] d\xi \quad [134]$$

Dall'integrazione si ottiene il seguente risultato:

$$P_2^i = \frac{\alpha}{d_i} \left[ 2 \frac{dT_i(t)}{dt} + \frac{dT_{i+1}(t)}{dt} \right] \quad [135]$$

$$P_2^i = \frac{\alpha}{d_i} \left[ \frac{dT_i(t)}{dt} + 2 \frac{dT_{i+1}(t)}{dt} \right] \quad [136]$$

Riscrivendo sotto forma matriciale sintetica si ha:

$$\frac{d_i}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dT_i(t)}{dt} \\ \frac{dT_{i+1}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \frac{d_i}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot |T(t)|_i \quad [137]$$

Si sviluppa successivamente la seconda parte  $P_2^i$  dell'integrale residuo pesato, per poi passare al sistema locale naturale:

$$P_2^i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \alpha \frac{dN_j(x)}{dx} \frac{d}{dx} \left[ \sum_{k=1}^{i+1} N_k(x) T_k(t) \right] dx = \frac{2\alpha}{d_i} \int_{-1}^1 \frac{dN_j(\xi)}{d\xi} \frac{d}{d\xi} \left[ \sum_{k=1}^{i+1} N_k(\xi) T_k(t) \right] d\xi \quad [138]$$

Il cui risultato è:

$$P_2^i = \frac{\alpha}{d_i} [-T_i(t) + T_{i+1}(t)] \quad [139]$$

$$P_2^i = \frac{\alpha}{d_i} [T_i(t) - T_{i+1}(t)] \quad [140]$$

In forma matriciale sintetica è:

$$\frac{\alpha}{d_i} \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_i(t) \\ T_{i+1}(t) \end{vmatrix} = \frac{\alpha}{d_i} \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \cdot |T(t)|_i \quad [141]$$

Per quanto riguarda la terza parte  $P_3^i$  si ha:

$$P_3^i = \left[ \alpha N_j(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x_i}^{x_{i+1}} \quad [142]$$

A questo punto serve distinguere se si tratta di un elemento intermedio ( $2 \leq i \leq n-1$ ), primo elemento ( $i=0$ ;  $x_i=0$ ) o ultimo elemento ( $i=n$ ;  $x_{i+1}=L$ ).

Per quando concerne l'elemento intermedio si ha:

$$P_3^i = \alpha \left[ N_j(x) \frac{d}{dx} \left( \sum_{k=1}^{i+1} N_k(x) T_k(t) \right) \right]_{x_i}^{x_{i+1}} = -\frac{2\alpha}{d_i} \left[ N_j(\xi) \frac{d}{d\xi} \left( \sum_{k=1}^{i+1} N_k(\xi) T_k(t) \right) \right]_{-1}^1 \quad [143]$$

Risolvendola si ottiene:

$$P_3^i = \frac{\alpha}{d_i} [-T_i(t) + T_{i+1}(t)] \quad [144]$$

$$P_3^i = \frac{\alpha}{d_i} [T_i(t) - T_{i+1}(t)] \quad [145]$$

La cui forma matriciale sintetica risulta:

$$\frac{\alpha}{d_i} \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_i(t) \\ T_{i+1}(t) \end{vmatrix} = \frac{\alpha}{d_i} \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \cdot |T(t)|_i \quad [146]$$

Per quanto riguarda il primo elemento, ipotizzando una condizione al contorno con scambio convettivo:

$$-\lambda \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x_i=0} = h_0 [T_{\infty,0}(t) - T_1(t)] \quad [147]$$

$$-\lambda \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x_i=0} = q_0(t) \quad [148]$$

Dalla quale si ottiene:

$$P_3^i = -\alpha \left[ N_j(x) \frac{dT}{dx} \right]_{x=0}^{x=d_1} = -\alpha \left[ N_j(x) \frac{d}{dx} \left( \sum_{k=1}^2 N_k(x) T_k(t) \right) \right]_{x=d_1} + \left[ \alpha N_j(x) \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} \quad [149]$$

$$P_3^i = -\frac{2\alpha}{d_1} \left[ N_j(\xi) \frac{dT}{d\xi} \left( \sum_{k=1}^2 N_k(\xi) T_k(t) \right) \right]_{\xi=1} - [\alpha N_j(\xi)]_{\xi=1} \cdot \left\{ -\frac{h_0}{\lambda} [T_{\infty,0}(t) - T_1(t)] \right\} \quad [150]$$

La quale, una volta risolta, fornisce i seguenti risultati:

$$P_3^i = \frac{\alpha h_0}{\lambda} [T_i(t) + T_{\infty,0}(t)] \quad [151]$$

$$P_3^i = \frac{\alpha}{d_1} [T_i(t) - T_2(t)] \quad [152]$$

Che in forma matriciale risulta:

$$P_3^i \Rightarrow \begin{bmatrix} \frac{\alpha h_0}{\lambda} & 0 \\ \frac{\alpha}{d_1} & -\frac{\alpha}{d_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \end{bmatrix} - \frac{\alpha h_0}{\lambda} \cdot \begin{bmatrix} T_{\infty,0}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad [153]$$

Sempre nell'ipotesi di condizione al contorno con scambio convettivo, per l'ultimo elemento si ha invece:

$$-\lambda \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x_i+1=L} = h_L [T_{n+1}(t) - T_{\infty,L}(t)] \quad [154]$$

$$-\lambda \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x_i+1=L} = q_L(t) \quad [155]$$

Si ricava:

$$P_3^i = -\alpha \left[ N_j(x) \frac{dT}{dx} \right]_{x=L-d_i}^{x=L} = \alpha \left[ N_j(x) \frac{d}{dx} \left( \sum_{k=n}^{n+1} N_k(x) T_k(t) \right) \right]_{x=L-d_i} - \alpha \left[ N_j(x) \frac{dT}{dx} \right]_{x=L} \quad [156]$$

$$P_3^i = \frac{2\alpha}{d_n} \left[ N_j(\xi) \frac{d}{d\xi} \left( \sum_{k=n}^{n+1} N_k(\xi) T_k(t) \right) \right]_{\xi=-1} + [\alpha N_j(\xi)]_{\xi=1} \cdot \left\{ \frac{h_L}{\lambda} [T_{n+1}(t) - T_{\infty,L}(t)] \right\} \quad [157]$$

La quale, una volta svolta, fornisce:

$$P_3^i = \frac{\alpha}{d_n} [-T_n(t) + T_{n+1}(t)] \quad [158]$$

$$P_3^i = \frac{\alpha h_L}{\lambda} [T_{n+1}(t) - T_{\infty,L}(t)] \quad [159]$$

Cioè la seguente forma matriciale:

$$P_3^i \Rightarrow \begin{bmatrix} -\frac{\alpha}{d_n} & \frac{\alpha}{d_n} \\ 0 & \frac{\alpha h_L}{\lambda} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_n(t) \\ T_{n+1}(t) \end{bmatrix} - \frac{\alpha h_L}{\lambda} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ T_{\infty,L}(t) \end{bmatrix} \quad [160]$$

Ricomponendo, quindi, le tre parti dell'integrale [124], si ottengono tre tipi diversi di equazioni, una per il primo elemento, una per l'elemento intermedio i e una per l'ultimo elemento n:

$$1. \quad \frac{d_1}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{T}_1(t) \\ \dot{T}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{d_1} & -1 & 1 \\ 1 & -1 & \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\alpha h_0}{\lambda} & 0 \\ \frac{\alpha}{d_1} & -\frac{\alpha}{d_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \end{bmatrix} = \frac{\alpha h_0}{\lambda} \cdot \begin{bmatrix} T_{\infty,0}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad [161]$$

$$2. \frac{d_1}{6} \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{T}_i(t) \\ \dot{T}_{i+1}(t) \end{vmatrix} + \frac{2\alpha}{d_i} \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_i(t) \\ T_{i+1}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad [162]$$

$$3. \frac{d_n}{6} \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{T}_n(t) \\ \dot{T}_{n+1}(t) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{\alpha}{d_n} & -1 \\ \frac{\alpha}{d_n} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\frac{\alpha}{d_n} & \frac{\alpha}{d_n} \\ 0 & \frac{\alpha h_L}{\lambda} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_n(t) \\ T_{n+1}(t) \end{vmatrix} = \frac{\alpha h_L}{\lambda} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ T_{\infty,L}(t) \end{vmatrix} \quad [163]$$

Ovvero un sistema di  $2n$  equazioni. Escludendo  $T_1(t)$  e  $T_2(t)$ , tuttavia tutte le altre  $T_i(t)$  compaiono sempre in due equazioni contigue che possono essere sommate tra loro, ottenendo così un sistema di  $n+1$  equazioni, con  $n$  in base al numero di  $T_i(t)$ . In maniera sintetica, il sistema si presenta nella seguente forma matriciale:

$$|M| \cdot |\dot{T}| + |K| \cdot |T| = |F| \quad [164]$$

Siano  $t_w$   $t_{w+1}$  due istanti di tempo successivi, tali che:

$$T^w = T(x, t_w) \quad T^{w+1} = T(x, t_{w+1}) \quad [165]$$

E descrivendo la temperatura nell'intervallo pari a  $\Delta t = T^{w+1} - T^w$  mediante l'espressione:

$$T = \theta T^{w+1} + (1 - \theta) T^w \quad [166]$$

Dove il parametro  $\theta$  è una variabile che tra 0 e 1, ed è utilizzato per monitorare l'accuratezza e la stabilità dell'algoritmo; e, dato che si ha  $\frac{dT}{dt} = \frac{T^{w+1} - T^w}{\Delta t}$ , i vettori delle variabili nel tempo possono essere scritti nel seguente modo:

$$|T| = \theta |T^{w+1}| + (1 - \theta) |T^w| \quad [167]$$

$$|F| = \theta |F^{w+1}| + (1 - \theta) |F^w| \quad [168]$$

$$|\dot{T}| = \frac{1}{\Delta t} |T^{w+1}| - \frac{1}{\Delta t} |T^w| \quad [169]$$

E, sostituendo le relazioni precedenti, il sistema si scrive:

$$[|M| + \theta \Delta t |K| |T^{w+1}|] = [|M| + (\theta - 1) \Delta t |K| |T^w|] + \Delta t [\theta |F^{w+1}| + (1 - \theta) |F^w|] \quad [170]$$

In maniera sintetica:

$$|A| |T^{w+1}| = |B| \quad [171]$$

Dove le matrici  $|A|$  e  $|B|$  sono costituite dai dati noti all'istante precedente a quello di calcolo. La soluzione si ottiene invertendo la matrice del sistema di equazioni:

$$|T^{w+1}| = |A|^{-1} |B| \quad [172]$$

Quest'ultima equazione è difficile da risolvere in quanto presenta delle matrici di notevole dimensioni. Mediante l'algebra numerica, tuttavia, si è in grado di risolvere il sistema senza ricorrere alla matrice inversa, ma ricorrendo a metodi iterativi. Tali procedure approssimate, partono da un'ipotesi di soluzione ed eseguono un'iterazione di calcolo in cui si ricavano stime

successive della soluzione di partenza. La convergenza normalmente si ricava calcolando lo scarto tra le iterazioni successive. Questa procedura ha il vantaggio rispetto ai metodi visti fino ad ora, di avere meno ipotesi limitative e, inoltre, di non avere nessun vincolo per le dimensioni degli elementi, il che significa che si possono utilizzare griglie molto fitte in cui è necessario ricavare maggior informazioni; viceversa, si possono utilizzare griglie meno fitte nelle zone di meno interesse. Infine, un altro aspetto positivo di questo metodo, è che le grandezze termo-fisiche significative per il problema possono variare da elemento ad elemento, senza dover necessariamente essere costanti da un intervallo di calcolo a quello successivo.

### 1.2.2.5 Metodo alle differenze finite (CFD)

Si esamina infine il secondo metodo analitico di integrazione dell'equazione di Fourier, ovvero il metodo alle differenze finite. Tale procedura si basa sull'utilizzo dell'espansione in serie di Taylor:

$$f(\gamma + \delta\gamma) = f(\gamma) + \delta\gamma \frac{df(\gamma)}{d\gamma} + \frac{(\delta\gamma)^2}{2} \frac{d^2f(\gamma)}{d\gamma^2} + \frac{(\delta\gamma)^3}{6} \frac{d^3f(\gamma)}{d\gamma^3} + \dots \quad [173]$$

$$f(\gamma - \delta\gamma) = f(\gamma) - \delta\gamma \frac{df(\gamma)}{d\gamma} + \frac{(\delta\gamma)^2}{2} \frac{d^2f(\gamma)}{d\gamma^2} - \frac{(\delta\gamma)^3}{6} \frac{d^3f(\gamma)}{d\gamma^3} + \dots \quad [174]$$

E sommando si ottiene:

$$\frac{d^2f(\gamma)}{d\gamma^2} = \frac{f(\gamma+\delta\gamma) - 2f(\gamma) + f(\gamma-\delta\gamma)}{(\delta\gamma)^2} + \varepsilon[(\delta\gamma)^2] \quad [175]$$

Dove il termine  $\varepsilon[(\delta\gamma)^2]$  rappresenta l'errore dovuto al troncamento della serie al termine relativo alla derivata seconda. Effettuando il troncamento dello sviluppo della prima serie al termine relativo alla derivata prima si ricava:

$$\frac{df(\gamma)}{d\gamma} = \frac{f(\gamma+\delta\gamma) - f(\gamma)}{\delta\gamma} + \varepsilon[(\delta\gamma)] \quad [176]$$

E per quanto riguarda la seconda serie:

$$\frac{df(\gamma)}{d\gamma} = \frac{f(\gamma) - f(\gamma-\delta\gamma)}{\delta\gamma} + \varepsilon[(\delta\gamma)] \quad [177]$$

In cui il termine  $\varepsilon[(\delta\gamma)]$  rappresenta l'errore dovuto al troncamento della serie al termine relativo alla derivata prima. Dopodiché si applicano le relazioni ricavate all'equazione di Fourier riferite ad una regione spaziale  $\delta x$  con indice  $i$ :

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad [178]$$

E, utilizzando la prima forma della derivata prima, si ricava:

$$\frac{T(i+1,t) - 2T(i,t) + T(i-1,t))}{(\delta x)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T(1,t+\delta t) - T(i,t)}{\delta t} \quad [179]$$

La quale può essere riscritta nella seguente forma:

$$T(i, t + \delta t) = \alpha \frac{\delta t}{(\delta x)^2} T(i + 1, t) + \left[ 1 - 2\alpha \frac{\delta t}{(\delta x)^2} \right] T(i, t) + \alpha \frac{\delta t}{(\delta x)^2} T(i - 1, t) \quad [180]$$

Nota come formulazione esplicita, poiché la temperatura nella regione spaziale, di indice  $i$ , all'istante  $t + \delta t$  si può ricavare direttamente partendo dalla distribuzione della temperatura all'istante precedente,



## Capitolo 2: Algoritmi di simulazione termo-energetica dinamica: Energy Plus

Design Builder utilizza come simulatore di calcolo dinamico EnergyPlus per quanto riguarda i moduli CFT e CFD. Grazie a questo software è possibile calcolare lo scambio termico attraverso l'involucro in regime variabile attraverso il metodo CFT e il calcolo dei carichi termici secondo il metodo ASHRAE "Air Heat Balance". Inoltre offre la possibilità di determinare il bilancio idrico nell'ambiente e delle pareti e la simulazione simultanea del sistema edificio-impianto. Nella figura 2.1 viene riportato lo schema di modellazione di EnergyPlus.

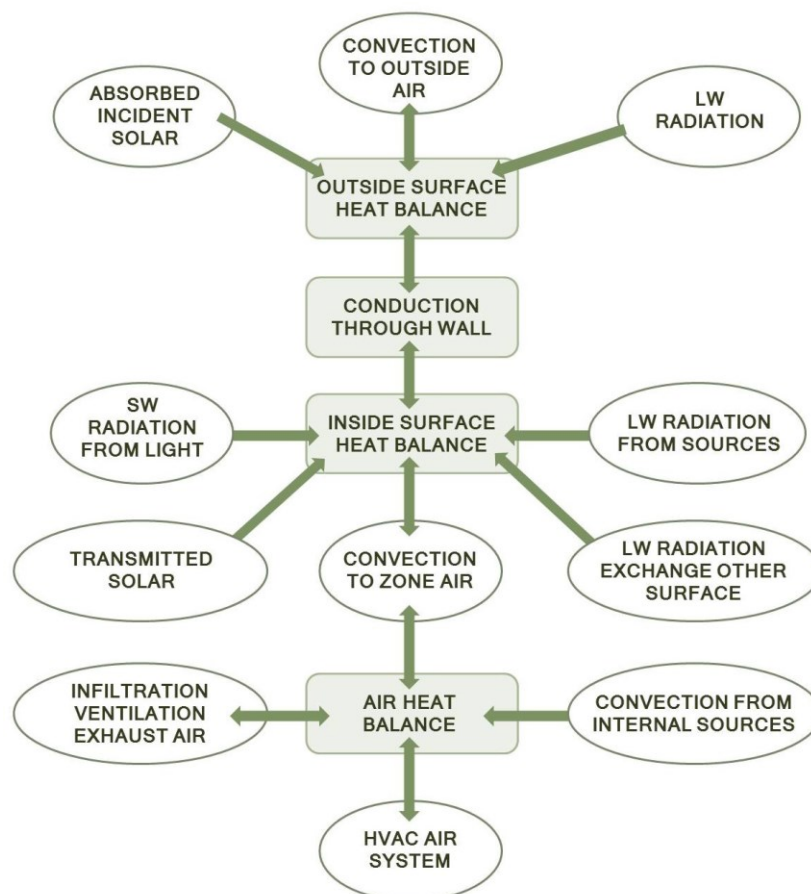


Figura 2.1: Schema del modello termico di un ambiente, J.D. Spitler, "Load calculation applications manual", (8)

Nella parte superiore della figura si può notare come, per ogni parete, venga determinato il bilancio sulla superficie esterna (outside surface heat balance), il bilancio sulla superficie interna, (inside surface heat balance) e tra di essi, venga calcolato il flusso termico trasmesso attraverso la parete (conduction through wall). Sempre nella parte superiore si possono osservare i contributi che rientrano nel bilancio sul nodo superficiale esterno (Absorbed incident solar, convection to outside air, Lw radiation) e i contributi che invece rientrano nel bilancio sul nodo superficiale interno (Sw radiation from light, from sources, transmitted solar, Lw radiation exchange other surface, convection to zone air). Tali contributi saranno trattati nello specifico successivamente. Passando alla parte inferiore dello schema, invece, si può

osservare il nodo relativo al bilancio termico dell'aria, connesso al flusso convettivo generato dalla ventilazione e dalle infiltrazioni (Infiltration ventilation exhaust air), al flusso di natura convettiva legate alle sorgenti interne (convection from internal sources), al flusso generato dai sistemi di riscaldamento e di condizionamento (HVAC air system) ed al flusso dovuto alla convezione con le pareti che delimitano l'ambiente (convection to zone air).

Per quanto concerne l'impianto di climatizzazione, la simulazione viene eseguita mediante la scomposizione dei componenti nei seguenti sottosistemi:

1. "Air loop" circuiti areaulici;
2. "Plant loop" circuiti idronici dei fluidi termovettori;
3. "Condenser loop" circuiti idronici dei fluidi di condensazione.

Per ogni sottosistema il software individua i componenti impiantistici relativi alla richiesta di energia e quelli relativi all'offerta di energia, come ad esempio i generatori di calore o gruppi frigo per il Plant loop e le torri evaporative o pozzi per il condenser loop. In Design Builder ci sono due modi per inserire i dati di input relativi agli impianti. Il più facile (HVAC simple), si inserisce l'efficienza di conversione della macchina in condizioni nominali e la prestazione della macchina nelle altre condizioni di lavoro è calcolata mediante una correzione in funzione del fattore di carico PLR (Part Load Ratio). Il secondo modo (HVAC detailed) richiede invece una conoscenza più approfondita, in quanto il software richiede come input i coefficienti delle curve caratteristiche dichiarati dai produttori delle macchine.

Uno dei vantaggi di Energyplus è che si tratta di un simulatore integrato, pertanto permette di risolvere simultaneamente i tre principali componenti: edificio, sistema ed impianto. Il programma, avendo gli elementi correlati, garantisce una simulazione realistica dal punto di vista fisico. L'intero programma integrato può essere rappresentato, in maniera più schematica, come una serie di elementi funzionali connessi da circuiti fluidi come riportato in figura 2.2

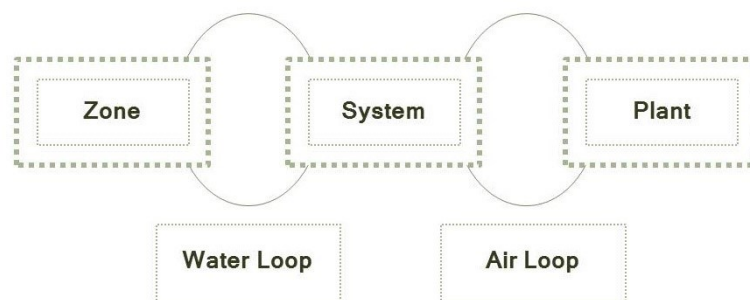


Figura 2.2: schema del metodo di risoluzione simultanea (8)

Il ruolo cruciale viene ricoperto dall'Integrated Solution Manager, il quale integra e controlla tutti gli elementi in EnergyPlus. I circuiti sono suddivisi in domanda e risposta, lo schema della soluzione passa attraverso successive iterazioni sostitutive fino ad avvicinare domanda e risposta, utilizzando la filosofia dell'aggiornamento continuo di Gauss-Seidell.

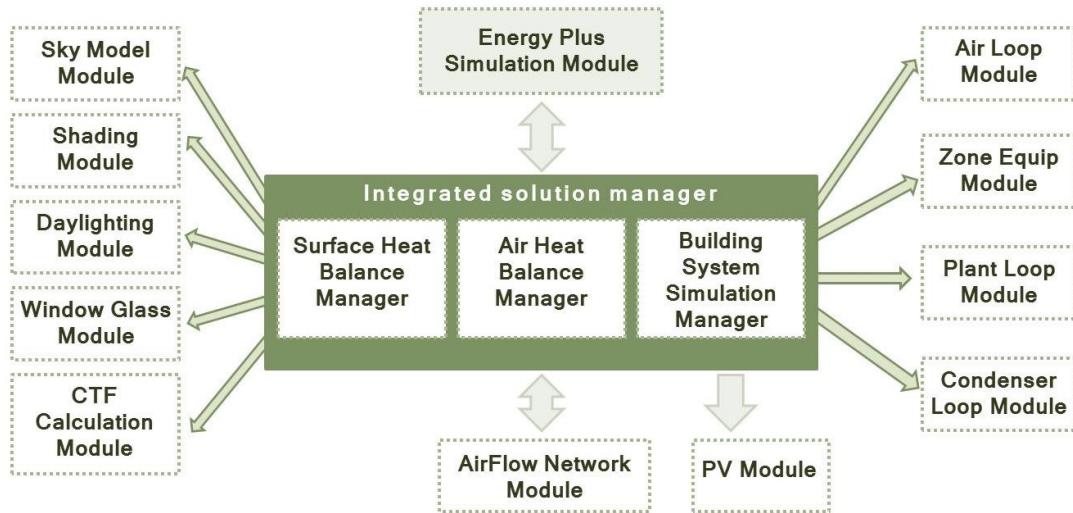


Figura 2.3: Schema delle relazioni tra i moduli di EnergyPlus (8)

Come si può notare dalla figura 2.3 l'Integrated Solution Manager è costituito da tre parti principali, Surface Heat Balance Manager, Air Heat Balance Manager e Building System Simulation Manager, che corrispondono rispettivamente alla costruzione, sistema ed impianto. La novità di questo software è basata sulla simulazione integrata dell'ambiente e dell'impianto, in altre parole, tutte e tre le parti sono risolte simultaneamente, seguendo un processo iterativo.

In particolare il Surface Heat Balance Manager definisce il bilancio termico in corrispondenza della superficie di ciascuna parete che delimita la zona termica, l'Air Heat Balance Manager determina il bilancio dell'ambiente attraverso la simulazione simultanea degli scambi termici radianti e convettivi e, infine, il Building System Simulation Manager esegue la simulazione della parte impiantistica. Come si può notare dalla figura 2.3, questi moduli principali interagiscono con altri secondari, tutti contenuti all'interno dell'Integrated Solution Manager, il quale effettua una simulazione simultanea e non a cascata. Questa procedura permette di avere una simulazione che si avvicina il più possibile al caso reale.

Nel dettaglio, il procedimento utilizzato da Energyplus prende il nome di predictor/corrector, il quale agisce mediante i seguenti passaggi:

1. Mediante l'equazione [180] viene determinata l'energia richiesta dal sistema affinché la temperatura di zona sia uguale alla temperatura di set point:

$$-\dot{Q}_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_Z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_Z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_Z) \quad [181]$$

Dove:

$\dot{Q}_{sys}$  è il risultato di output del sistema

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  è la somma dei carichi convettivi

$\sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_Z)$  è il calore trasferito per convezione dalle superfici di zona

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_Z)$  è il calore trasferito per effetto della miscelazione di aria tra zone diverse

$\dot{m}_{inf} c_p (T_\infty - T_z)$  calore trasferito per effetto dell'infiltrazione di aria esterna

2. Tramite l'energia ricavata, viene simulato il sistema per ricavare la sua attuale capacità di risposta al tempo  $t$  della simulazione e, se necessario, viene eseguita una simulazione dell'impianto.
3. L'attuale capacità del sistema calcolata, viene successivamente impiegata nell'equazione [182] per ricavare la temperatura risultante della zona:

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_{i,t} + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} c_p T_\infty + \dot{m}_{sys} c_p T_{supply} - \left(\frac{C_z}{\delta_t}\right) \left(-3T_z^{t-\delta_t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\delta_t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\delta_t}\right)}{\left(\frac{11}{6}\right)\left(\frac{C_z}{\delta_t}\right) + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p + \dot{m}_{sys} c_p} \quad [182]$$

Questa è la formulazione utilizzata dall'Integrated Solution Manager. Fino a quando il carico termico della zona guida l'intero processo, quel carico è impiegato come punto di inizio che genera una domanda al sistema. Il sistema effettua una simulazione per fornire il carico di supporto e la temperatura di zona se necessario viene corretta.

## 2.1 Air Heat balance

Il bilancio termico dell'aria "Air Heat balance", come accennato precedentemente, è connesso al flusso convettivo generato dalla ventilazione e dalle infiltrazioni, al flusso di natura convettiva legate alle sorgenti interne, al flusso generato dai sistemi di riscaldamento e di condizionamento ed al flusso dovuto alla convezione con le pareti che delimitano l'ambiente.

L'air Heat balance si basa sulle seguenti ipotesi:

- Temperatura dell'aria ambiente uniforme;
- Temperatura delle superfici uniforme;
- Irraggiamento ad alta e a bassa lunghezza d'onda uniforme;
- Superfici uniformemente diffondenti;
- Trasmissione del calore per conduzione monodimensionale.

L'Air Heat balance viene definito mediante la seguente equazione:

$$C_z \frac{dt_z}{dt} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c} + \sum_{i=1}^{N_{sup}} \dot{Q}_{i,s} + \dot{Q}_V + \dot{Q}_N = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c} + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (t_{s,i} - t_z) + \dot{m}_V c_p (t_\infty - t_z) + \dot{Q}_N \quad [183]$$

Dove:

$C_z$  è la capacità termica dell'aria della zona e delle masse termiche in equilibrio con l'aria ambiente [J/°C]

$N$  è il numero delle sorgenti interne convettive;

$\dot{Q}_{i,c}$  è il flusso termico disperso dalle sorgenti interne convettive [W]

$N_{sup}$  è il numero delle superfici della zona termica a temperatura  $t_s$

$\dot{Q}_{i,s}$  è il flusso termico disperso da ciascuna delle superfici della zona termica [W]

$\dot{Q}_V$  è il carico legato alla ventilazione

$\dot{Q}_N$  è il carico legato all'impianto

$h_i$  è il coefficiente di scambio termico convettivo superficie-aria interna [W/m² K]

$A_i$  è l'area della superficie  $i$ -esima [m²]

$t_{s,i}$  è la temperatura superficiale della  $i$ -esima parete [°C]

$\dot{m}_v$  è la portata di aria legata alla ventilazione [kg/s]  
 $c_p$  è il calore specifico dell'aria [J/kg°C]  
 $t_\infty$  è la temperatura dell'aria di ventilazione [°C]

Come si può notare dall'equazione, i termini legati al flusso termico disperso per infiltrazione e per ventilazione tra le zone termiche adiacenti non sono presenti in quanto tali apporti sono stati trascurati.

## 2.2 Inside heat balance

Il bilancio termico relativo alle superfici interne della zona termica (Inside heat balance) è il fulcro del bilancio termico, ed è normalmente modellato con quattro coppie di componenti di trasferimento del calore:

1. Conduzione attraverso i componenti dell'involucro dell'edificio,
2. Convezione con l'aria;
3. Radiazione a bassa lunghezza d'onda;
4. Radiazione ad elevata lunghezza d'onda.

Per radiazione a bassa lunghezza d'onda si intende sia alla radiazione solare entrante nella zona termica tramite i componenti vetrati che dall'emissione delle sorgenti interne, come ad esempio le lampadine. La radiazione ad elevata lunghezza d'onda, invece, comprende l'assorbimento e la successiva emissione in ambiente, come ad esempio il soffitto che assorbe la radiazione dalla lampadina ed emette in ambiente una quota parte di energia assorbita.

Il bilancio termico sulla superficie interna della parete è descritto mediante la seguente equazione:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad [184]$$

In cui:

$q''_{LWX}$  è il flusso di scambio termico radiativo ad onda lunga tra le superfici della zona;

$q''_{SW}$  è il flusso radiativo ad onda corta dalle luci alla superficie;

$q''_{LWS}$  è il flusso radiativo ad onda lunga dagli apparecchi presenti nella zona termica;

$q''_{ki}$  è il flusso conduttivo attraverso la parete;

$q''_{sol}$  è il flusso radiativo solare trasmesso e assorbito dalla superficie;

$q''_{conv}$  è il flusso termico convettivo verso l'aria della zona.

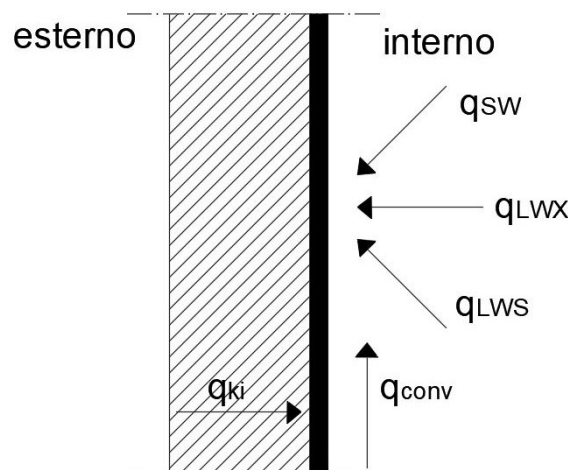


Figura 2.2.1: bilancio termico di calore sul lato interno della zona termica, (8)

## 2.3 Outside surface heat balance

Il bilancio sulla superficie esterna “outside surface heat balance” è definito tramite la seguente equazione:

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad [185]$$

Dove:

$q''_{\alpha sol}$  è il flusso di calore assorbito dalla radiazione solare diretta e diffusa (bassa lunghezza d'onda);

$q''_{LWR}$  è il flusso radiativo ad alta lunghezza d'onda (termico) scambiato con l'aria e con il contesto;

$q''_{conv}$  è lo scambio termico convettivo con l'aria esterna;

$q''_{ko}$  è lo scambio termico conduttivo attraverso la parete.

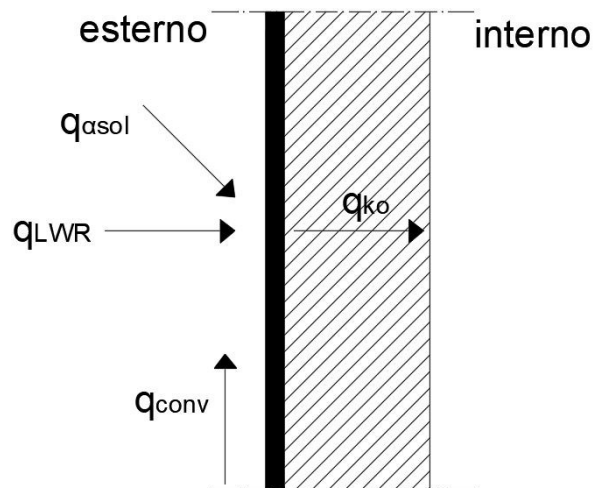
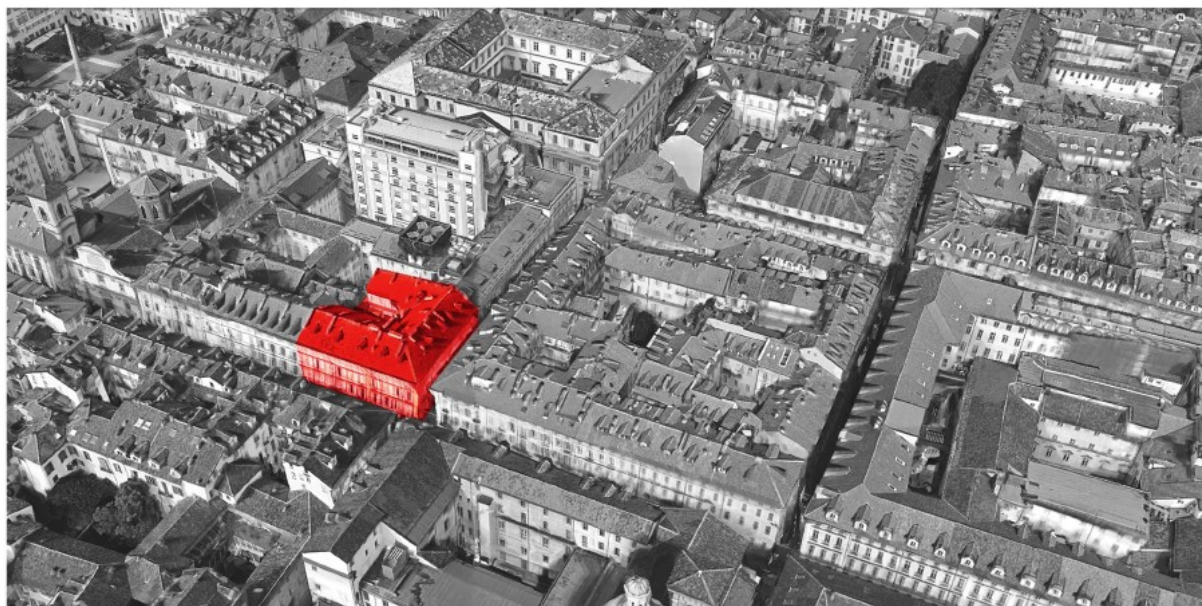


Figure 2.3.1: bilancio termico di calore sul lato esterno della zona termica, (8)

## Capitolo 3- Inquadramento del caso di studio: Palazzo Corte Riflessa



**Figura 3.1 – Palazzo Corte Riflessa**

L'edificio oggetto di studio è situato nel centro storico di Torino, è costituito da due corpi fabbrica che si affacciano su Via Sant'Agostino e su Via Garibaldi, più una manica interna confinante con le corti dei fabbricati adiacenti. L'immobile in questione ha origine storica, pertanto è soggetto a vincoli di conservazione e di tutela da parte della Soprintendenza. Realizzato prevalentemente in muratura portante di mattoni pieni, muri a spina centrali anch'essi in mattoni pieni, orizzontamenti misti in latero cemento e solai lignei, copertura lignea priva di isolamento con rivestimento in laterizio e serramenti in legno provvisti di vetro singolo o doppio.

Nelle tabelle 3.1 e 3.2 vengono riportati i dati generali e climatici relativi al sito in cui si trova l'edificio oggetto di studio:

**Tabella 3.1: Dati climatici della località**

| Caratteristiche geografiche      |              |
|----------------------------------|--------------|
| Località                         | Torino       |
| Provincia                        | Torino       |
| Altitudine s.l.m.                | 239 m        |
| Latitudine nord                  | 45° 7'       |
| Longitudine Est                  | 7° 43'       |
| Caratteristiche edificio         |              |
| Categoria DPR 412                | E.1          |
| Stato di occupazione ed utilizzo | Residenziale |



| Caratteristiche del vento               |                             |
|-----------------------------------------|-----------------------------|
| Regione di vento                        | A                           |
| Direzione prevalente                    | Nord-Est                    |
| Velocità media del vento                | 0,80 m/s                    |
| Velocità massima del vento              | 1,60 m/s                    |
| Dati invernali                          |                             |
| Temperatura esterna di progetto         | -8.0 °C                     |
| Stagione di riscaldamento convenzionale | Dal 15 ottobre al 15 aprile |
| Gradi giorno                            | 2617                        |
| Zona climatica                          | E                           |
| Durata convenz. Periodo riscaldamento   | 183 gg                      |
| Dati estivi                             |                             |
| Temperatura esterna bulbo asciutto      | 30,5 °C                     |
| Temperatura esterna bulbo umido         | 22,3 °C                     |
| Umidità relativa                        | 50,0 %                      |
| Escursione termica giornaliera          | 11 °C                       |

### 3.1 Descrizione tipologica del fabbricato

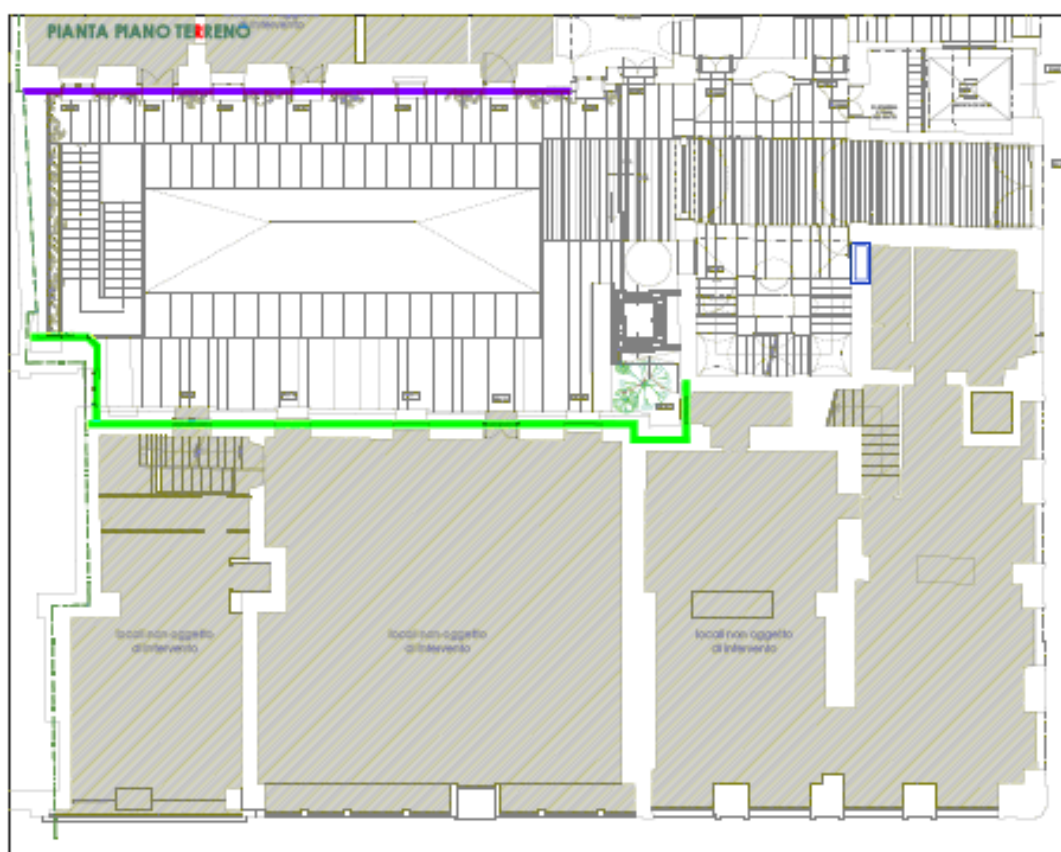
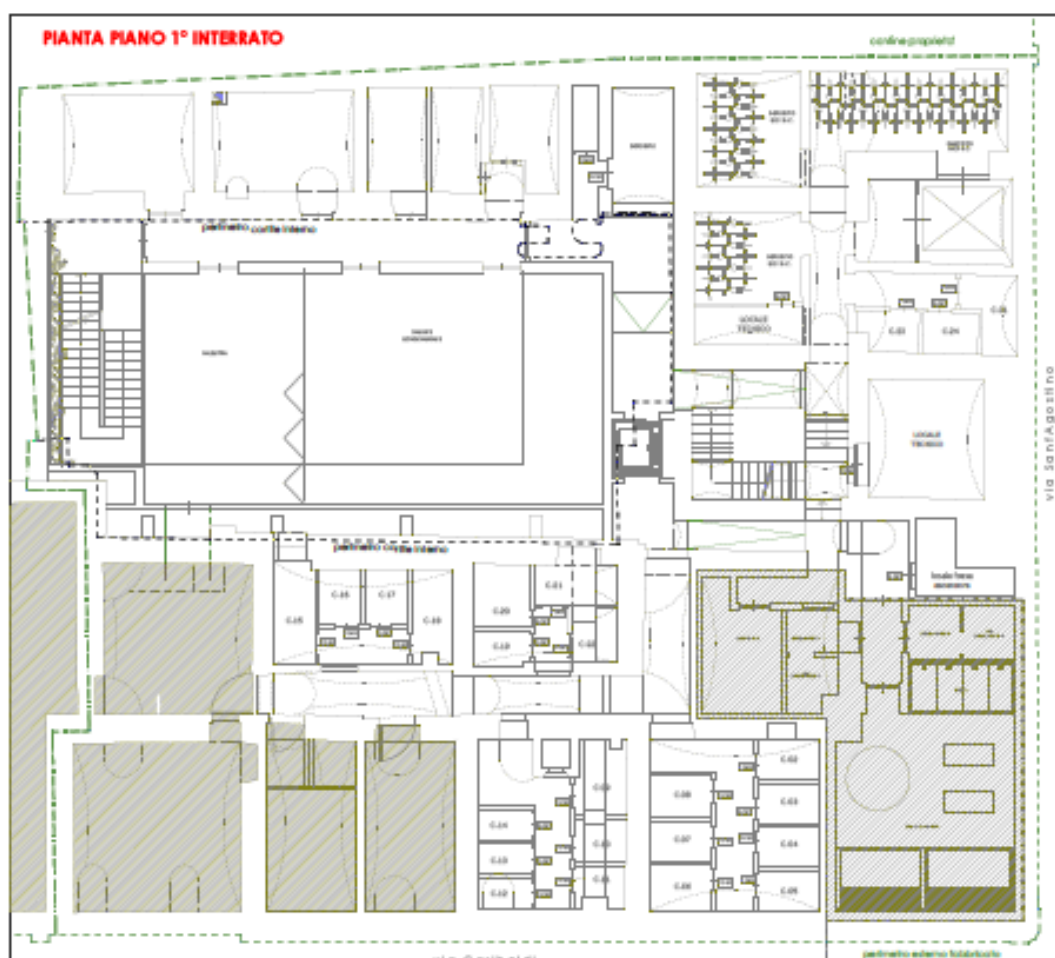
L'edificio oggetto di studio si sviluppa su cinque piani fuori terra e presenta un piano interrato. In quest'ultimo livello sono presenti le cantine, due locali tecnici, tre locali depositi ed un centro benessere di altra proprietà. Al piano terreno, invece, è presente l'ingresso carrabile su Via Sant'Agostino, la portineria e tre locali non oggetto del seguente intervento. Salendo al piano primo troviamo il primo appartamento ed altri locali di altre proprietà, pertanto quest'ultimi sono esclusi dall'appalto. Dal secondo al quinto piano, invece, sono presenti i restanti appartamenti, per un numero complessivo pari a 24. Sono presenti tre appartamenti che si sviluppano su due piani, in particolare dal piano quarto al quinto e si tratta degli alloggi 17, 18 e 19.

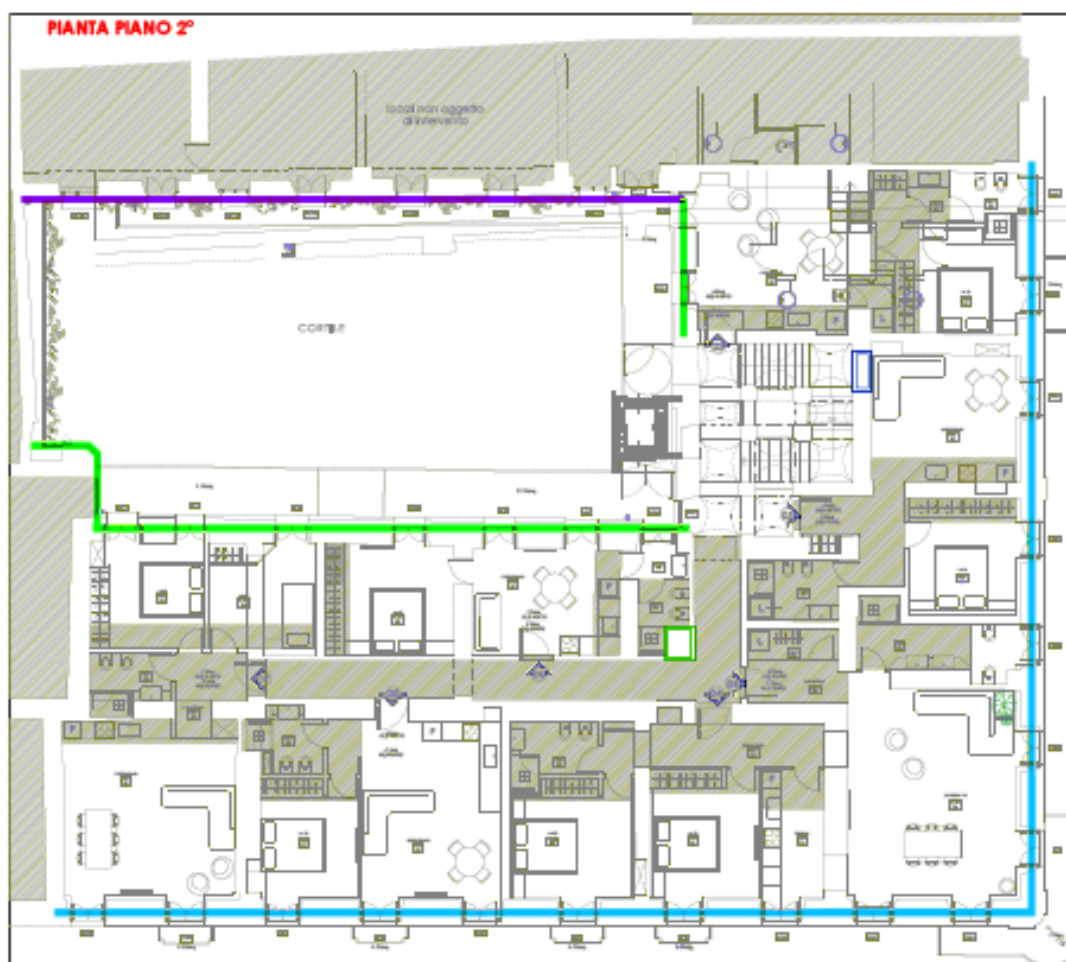
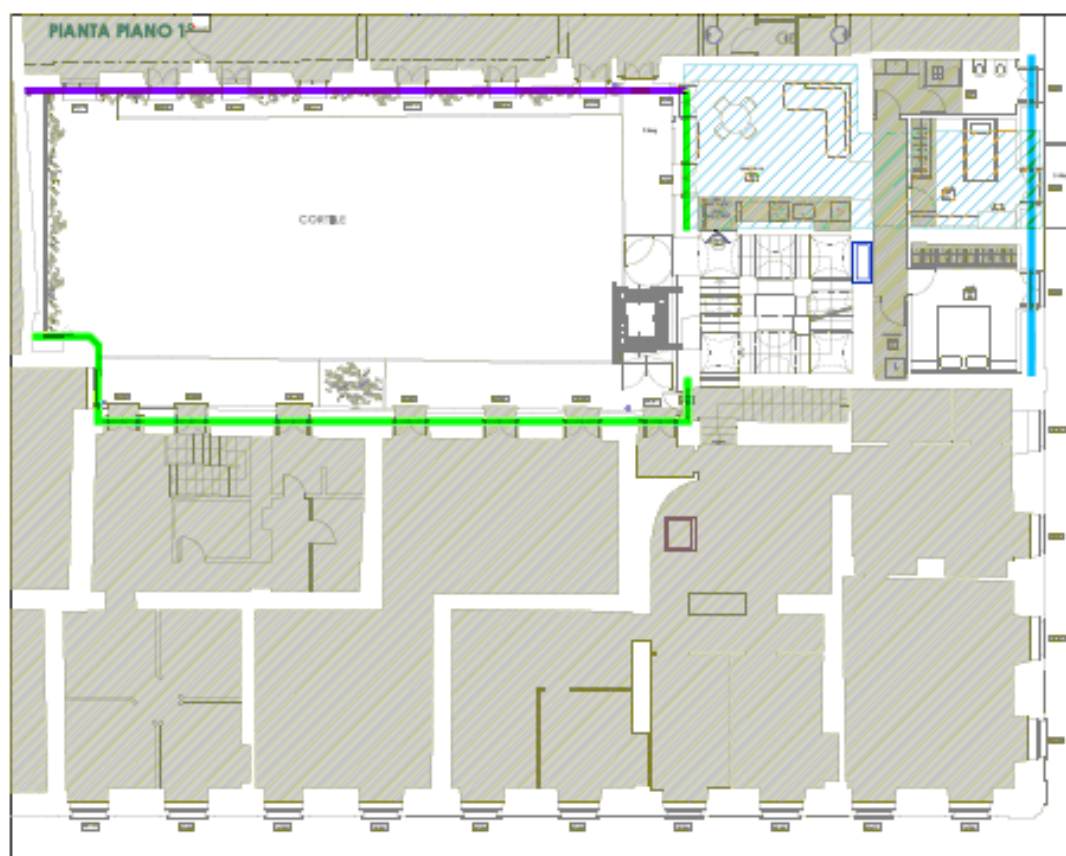
Gli alloggi sono così distribuiti:

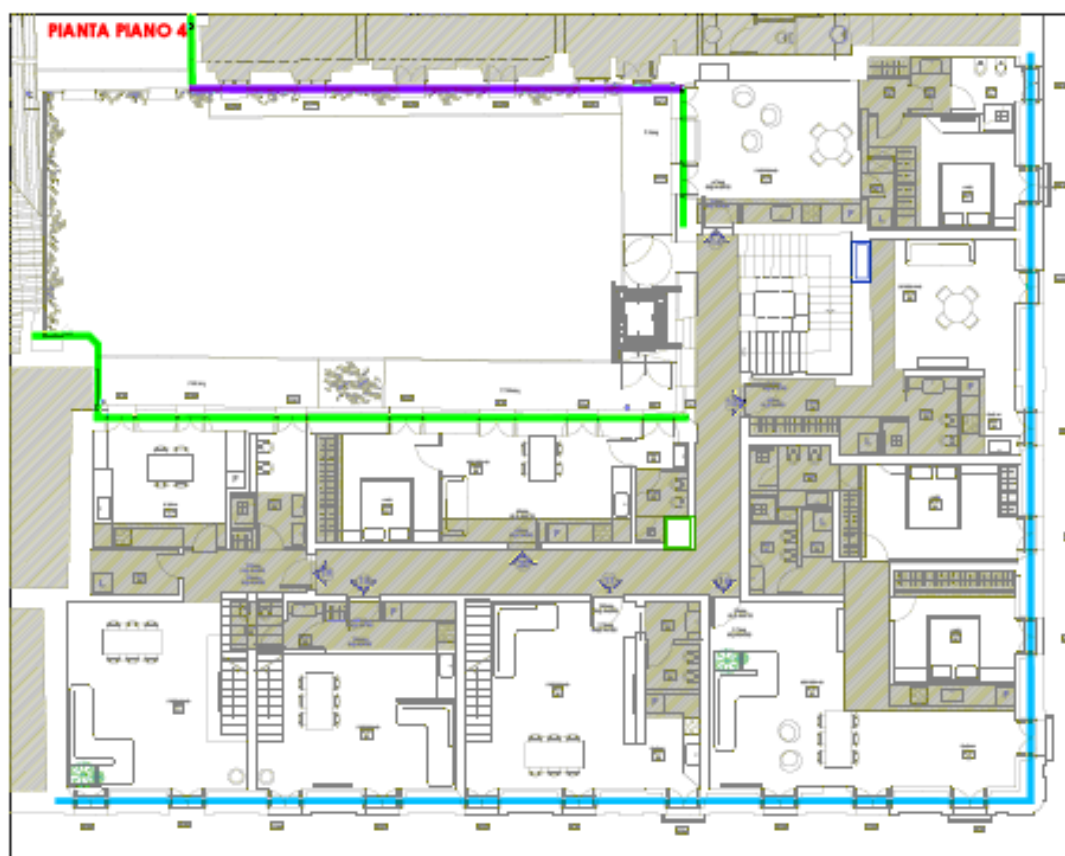
- Piano primo: alloggio 1
- Piano secondo: alloggi 2-3-4-5-6-7
- Piano terzo: alloggi 8-9-10-11-12-13
- Piano quarto: alloggi 14-15-16-17-18-19-20
- Piano quinto: 17-18-19-21-22-23-24

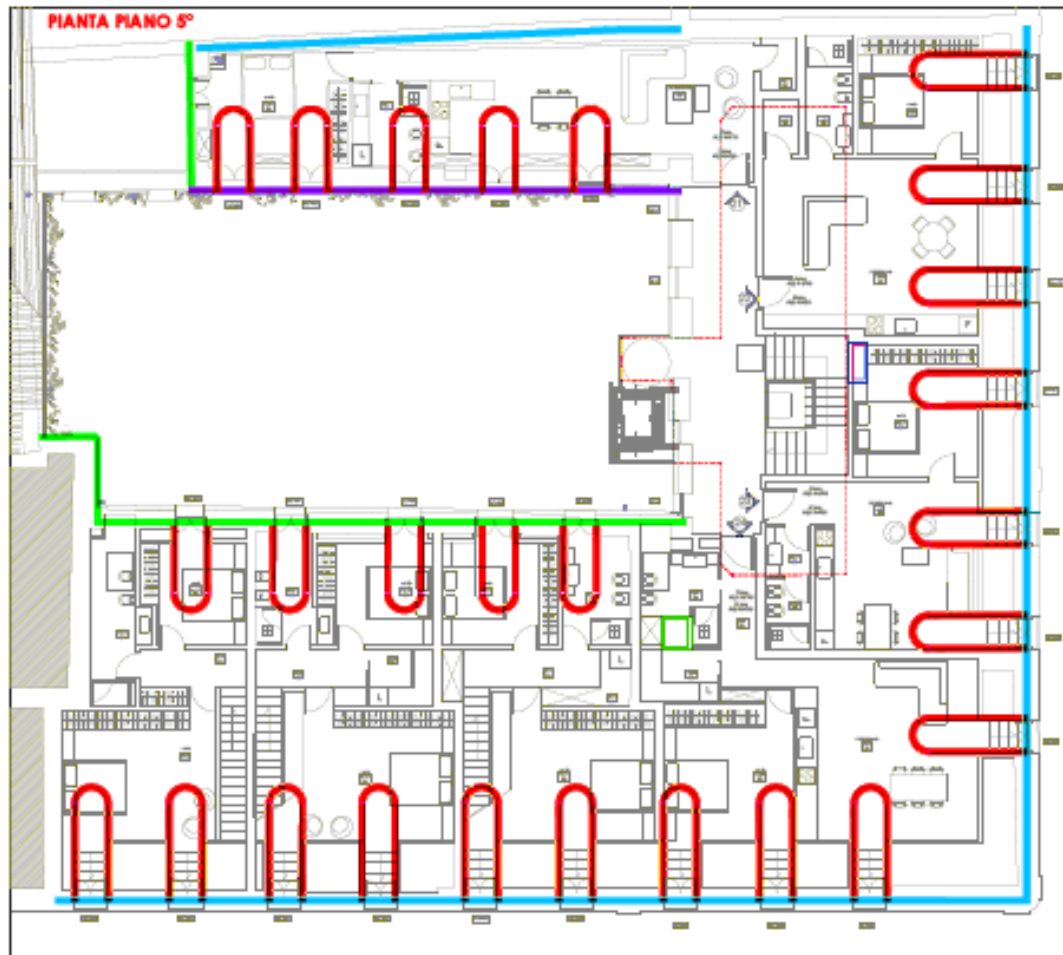
Al piano copertura, invece, come si vedrà successivamente, verrà ricavato il locale tecnico per la nuova centrale termofrigorifera. Di seguito si riportano le piante dei vari piani in cui sono evidenziate le differenti tipologie murarie.











Per evidenziare le diverse tipologie di murature è stata utilizzata la seguente legenda:

|                                                                                     |                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
|  | Struttura muraria tipo M1  |
|  | Struttura muraria tipo M3  |
|  | Struttura muraria tipo M7  |
|  | Struttura muraria tipo M14 |

### 3.1.1 Descrizione dell'involucro esistente

L'edificio oggetto di studio allo stato attuale presenta una muratura portante realizzata in mattoni pieni, muri a spina centrali anch'essi in mattoni pieni, orizzontamenti misti in latero cemento e solai lignei, copertura lignea priva di isolamento con rivestimento in laterizio e serramenti in legno provvisti di vetro singolo o doppio. Si riportano le stratigrafie e le caratteristiche dei materiali costituenti le pareti e i solai dello stato attuale.

- Solai interpiano

Tabella 3.1.1.1 – Caratteristiche solaio di interpiano

| Caratteristica                 | U.d.m              | valore       |
|--------------------------------|--------------------|--------------|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K | <b>2,290</b> |
| Spessore                       | mm                 | <b>285</b>   |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup> | <b>613</b>   |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K | <b>0,664</b> |
| Fattore di attenuazione        | -                  | <b>0,290</b> |
| Sfasamento                     | h                  | <b>8,39</b>  |

Tabella 3.1.1.2 – Stratigrafia solaio di interpiano

| n. | Descrizione strato              | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] |
|----|---------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|
| -  | Resistenza superficiale interna | -           | -               | 0,170                      | -                             | -             |
| 1  | Piastrelle ceramica             | 20          | 1,300           | 0,015                      | 2300                          | 0,84          |
| 2  | massetto di livellamento        | 50          | 1,400           | 0,036                      | 2000                          | 1,00          |
| 3  | Caldana in cemento armato       | 80          | 2,150           | 0,037                      | 2500                          | 0,88          |
| 4  | Volta in mattoni                | 120         | 0,900           | 0,133                      | 2000                          | 0,84          |
| 5  | Intonaco interno                | 15          | 1,000           | 0,015                      | 1800                          | 0,84          |
| -  | Resistenza superficiale esterna | -           | -               | 0,170                      | -                             | -             |

Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica;  
**C** = Capacità termica specifica.



- Parete su strada (M1)

Tabella 3.1.1.3 – Caratteristiche parete su strada (M1)

| Caratteristica                 | U.d.m              | valore       |
|--------------------------------|--------------------|--------------|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K | <b>0,910</b> |
| Spessore                       | mm                 | <b>925</b>   |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup> | <b>1843</b>  |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K | <b>0,003</b> |
| Fattore di attenuazione        | -                  | <b>0,003</b> |
| Sfasamento                     | h                  | <b>5,86</b>  |

Tabella 3.1.1.4 – Stratigrafia parete su strada (M1)

| n. | Descrizione strato              | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] |
|----|---------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|
| -  | Resistenza superficiale interna | -           | -               | 0,130                      | -                             | -             |
| 1  | Intonaco interno                | 15          | 1,000           | 0,015                      | 1800                          | 0,84          |
| 2  | Malta cementizia                | 20          | 1,400           | 0,014                      | 2000                          | 1,00          |
| 3  | Muratura in laterizio           | 850         | 0,990           | 0,859                      | 2000                          | 1,00          |
| 4  | Malta cementizia                | 20          | 1,400           | 0,014                      | 2000                          | 1,00          |
| 5  | Intonaco esterno                | 20          | 0,750           | 0,027                      | 1800                          | 0,84          |
| -  | Resistenza superficiale esterna | -           | -               | 0,071                      | -                             | -             |

Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica; **C** = Capacità termica specifica.

- Parete su corte interna (M3)

Tabella 3.1.1.5 – Caratteristiche parete su corte interna (M3)

| Caratteristica                 | U.d.m              | valore       |
|--------------------------------|--------------------|--------------|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K | <b>1,056</b> |
| Spessore                       | Mm                 | <b>775</b>   |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup> | <b>1543</b>  |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K | <b>0,010</b> |
| Fattore di attenuazione        | -                  | <b>0,009</b> |
| Sfasamento                     | h                  | <b>0,95</b>  |

Tabella 3.1.1.6 – Stratigrafia parete su corte interna (M3)

| n. | Descrizione strato              | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] |
|----|---------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|
| -  | Resistenza superficiale interna | -           | -               | 0,130                      | -                             | -             |
| 1  | Intonaco interno                | 15          | 1,000           | 0,015                      | 1800                          | 0,84          |
| 2  | Malta cementizia                | 20          | 1,400           | 0,014                      | 2000                          | 1,00          |
| 3  | Muratura in laterizio           | 700         | 0,990           | 0,707                      | 2000                          | 1,00          |
| 4  | Malta cementizia                | 20          | 1,400           | 0,014                      | 2000                          | 1,00          |
| 5  | Intonaco esterno                | 20          | 0,750           | 0,027                      | 1800                          | 0,84          |
| -  | Resistenza superficiale esterna | -           | -               | 0,071                      | -                             | -             |

Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica; **C** = Capacità termica specifica.

- **Copertura in legno esistente**

Tabella 3.1.1.9– Caratteristiche solaio di copertura

| Caratteristica                 | U.d.m              | valore       |
|--------------------------------|--------------------|--------------|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K | <b>0,500</b> |
| Spessore                       | mm                 | <b>305</b>   |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup> | <b>106</b>   |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K | <b>0,064</b> |
| Fattore di attenuazione        | -                  | <b>0,128</b> |
| Sfasamento                     | h                  | <b>1,56</b>  |

Tabella 3.1.1.10 – Stratigrafia solaio di copertura

| n. | Descrizione strato              | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] |
|----|---------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|
| -  | Resistenza superficiale interna | -           | -               | 0,130                      | -                             | -             |
| 1  | Orditura primaria               | 100         | 0,120           | 0,833                      | 450                           | 2,70          |
| 2  | Orditura secondaria             | 70          | 0,120           | 0,833                      | 450                           | 2,70          |
| 3  | Pianella in cotto               | 15          | 0,038           | 3,421                      | 600                           | 0,84          |
| 4  | Orditura in listelli            | 40          | 0,120           | 0,833                      | 450                           | 2,70          |
| 5  | Manto di copertura              | 80          | 0,350           | 0,087                      | 30                            | 0,84          |
| -  | Resistenza superficiale esterna | -           | -               | 0,071                      | -                             | -             |

Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica;  
**C** = Capacità termica specifica; **μ**= Fattore di resistenza alla diffusione del vapore.



### 3.1.2 Descrizione dell'impianto esistente

L'edificio allo stato attuale è caratterizzato da un impianto di tipo centralizzato, con centrale di distribuzione e radiatori in ghisa, situati all'interno degli alloggi. Nel dettaglio, l'impianto di riscaldamento è costituito da una centrale termica alimentata a gas metano, situata nel locale tecnico ubicato al piano interrato. In tale vano sono presenti due generatori di calore di potenza termica singola pari a 400.000 Kcal/h con bruciatori pressurizzati a gas metano di rete e sono installate inoltre due elettropompe per la spinta dell'acqua calda. Per quanto riguarda il sistema di distribuzione, è presente un circuito primario a due tubi realizzato in tubazioni in acciaio nero. Al circuito orizzontale a soffitto del piano primo interrato sono collegate le colonne montanti, dalle quali per ogni piano derivano le alimentazioni dei singoli alloggi. I corpi scaldanti in ghisa situati negli alloggi sono alimentati mediante una distribuzione orizzontale in parallelo.

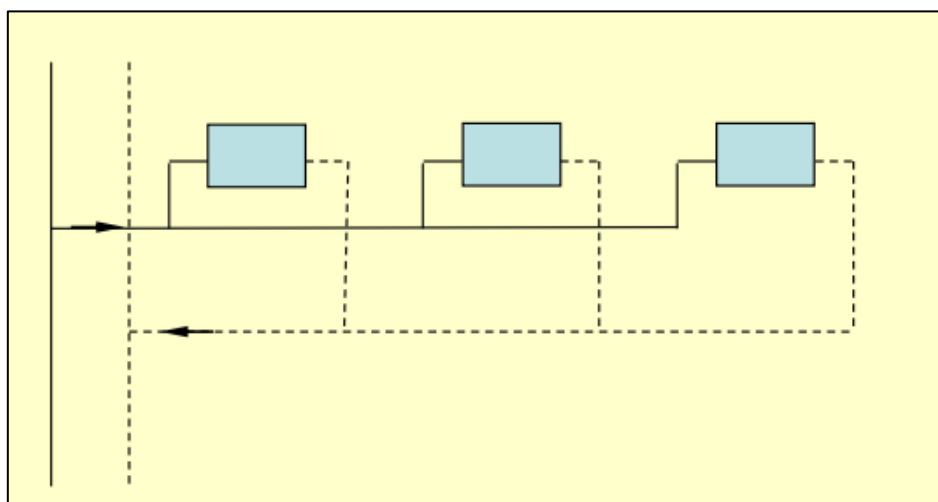


Figura 3.1.2.1: Distribuzione orizzontale in derivazione a due tubi

Per quanto riguarda l'impianto idrico sanitario, l'edificio allo stato attuale prevede una distribuzione dell'acqua fredda mediante tubazioni in acciaio zincato che corrono parallelamente alle tubazioni dell'impianto di riscaldamento, ovvero a soffitto nel piano interrato ed in cavedi verticali per servire le singole unità. La produzione di acqua calda sanitaria, invece, avviene tramite bollitori elettrici autonomi allocati in ogni appartamento.

## 3.2 Descrizione dello stato di progetto

I lavori previsti, oltre a riguardare la riqualificazione energetica dell'involucro, prevedono la riqualificazione energetica impiantistica. Saranno quindi previste una serie di opere, che interessano ad esempio la riqualificazione delle unità abitative nella nuova configurazione architettonica, la riqualificazione del vano scala, la realizzazione delle facciate interne e dell'interno cortile e molte altre opere di carattere edile ed impiantistico. Tutti interventi aventi come obiettivo finale di massimizzare l'efficienza energetica nella produzione e distribuzione di fluidi termovettori e sanitari.

I principali corpi d'opera relativi ai lavori citati precedentemente, appartengono a due proprietà, nello specifico alla Reale Immobili S.p.a. e alla Reale Mutua di Assicurazioni S.p.a.

In particolare, le aree di proprietà della Reale Immobili S.p.a sono:

- centrale termofrigorifera, posizionata in copertura in cui sono presenti i gruppi frigoriferi, le caldaie, il sistema di produzione dell'acqua calda sanitaria e l'impianto solare termico;
- centrale idrica, situata al piano interrato, in cui sono presenti i sistemi di trattamento dell'acqua ad uso umano e tecnologico;
- n° 24 unità residenziali distribuite dal piano primo al piano sottotetto delle due maniche principali (rappresentate in giallo nell'immagine 3.2.1), più una unità del sottotetto della manica interna.
- n° 1 unità commerciale, presente al piano terra e primo, con affaccio su Via Garibaldi;
- n° 1 unità con destinazione d'uso da definirsi, da realizzarsi al piano interrato sotto il cortile interno.

Per quanto riguarda la Reale Mutua di Assicurazioni S.p.a, invece, sono di sua pertinenza l'area uffici distribuita tra piano primo e quarto della manica interna (indicata in azzurro nell'immagine 3.2.1)

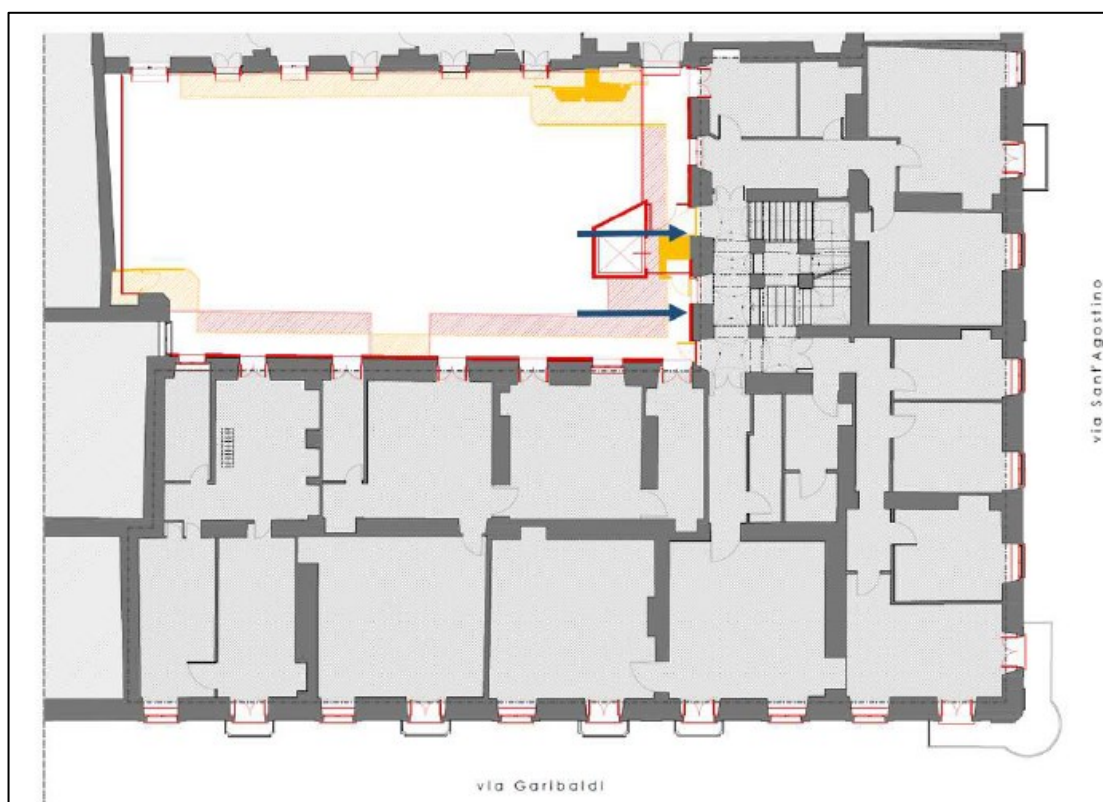


**Figura 3.2.1 - Pianta delle aree di intervento**

Al fine di ridurre notevolmente i fabbisogni di energia termica e frigorifera del complesso, compatibilmente con i vincoli storico architettonici dell'edificio, si prevedono di adottare le seguenti opere di isolamento termico, riassunte nelle seguenti macro aree:

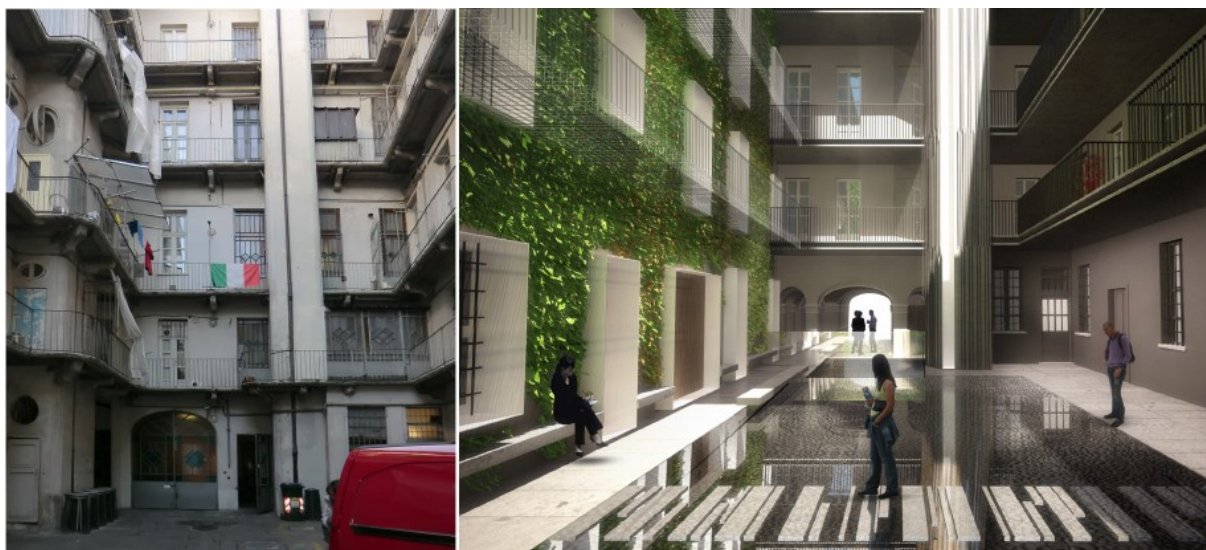
- isolamento a cappotto esterno delle pareti su cortile interno;
- isolamento interno delle pareti su Via Garibaldi e Via Sant'Agostino;
- sostituzione di tutti i serramenti esistenti;
- isolamento dei solai di copertura;
- isolamento dei solai inferiori disperdenti;
- taglio termico dei balconi.

Per quanto concerne l'isolamento delle pareti del cortile interno (figura 3.2.2) si è optato per un pannello in lana di roccia, spessore 12 cm, conducibilità termica  $\lambda_D = 0,036 \text{ W/mK}$ . La seguente soluzione è stata pensata per tutte le strutture su spazi riscaldati e non, incluse le pareti tra vano scala ed esterno, nonostante sia un ambiente non abitato. Questa scelta è stata scelta al fine di rispettare i limiti di trasmittanza indicati al punto 1.3.7 della DGR 46-11968/09 e per garantire una temperatura dell'aria più elevata. Per la correzione dei ponti termici dell'imbotte esterna dei serramenti e dei davanzali, invece, sono state preferite delle lastre in polistirene espanso con grafite, con spessore ridotto pari a 2 cm e conducibilità termica  $\lambda_D$  pari a  $0,031 \text{ W/mK}$ . Infine, per lo zoccolo di partenza e per i balconi, quindi per le zone soggette a spruzzo d'acqua, si è pensato di impiegare dei pannelli in EPS-P idrofobizzato, di spessore 12 cm e altezza di 30 cm sopra al piano di calpestio. Per la finitura superficiale del capotto è stato adottato un rivestimento a base di silicati-silossani per permettere una maggiore traspirabilità delle pareti.



**Figura 3.2.2 - Pianta piano tipo – indicazione pareti lato cortile interno**

Sulle pareti affacciate su Via Garibaldi e su Via Sant'Agostino, invece, si prevede un isolamento termico posato sulla superficie interna della parete esistente, costituito da una controparete formata da uno strato isolante incollato alla facciata, da un secondo strato isolante e da una doppia lastra di finitura interna. Il primo strato di isolante permette anche la permeabilità al vapore, mentre il secondo strato contiene le installazioni impiantistiche come scatole elettriche, corrugati, etc. Al fine di correggere i ponti termici e scongiurare il rischio di sviluppo di muffe o condense, l'isolante fissato alla parete è stato posato risvoltandolo nell'imbotte interna di porte e finestre e chiudendolo in battuta con i serramenti. Allo stesso modo, per i solai intermedi l'isolamento termico è stato risvoltato su soffitto e pavimento per la profondità di un metro dal filo interno del vetro, a correzione del ponte termico parete – solaio.



**Figura 3.2.3: confronto stato di fatto-stato di progetto**

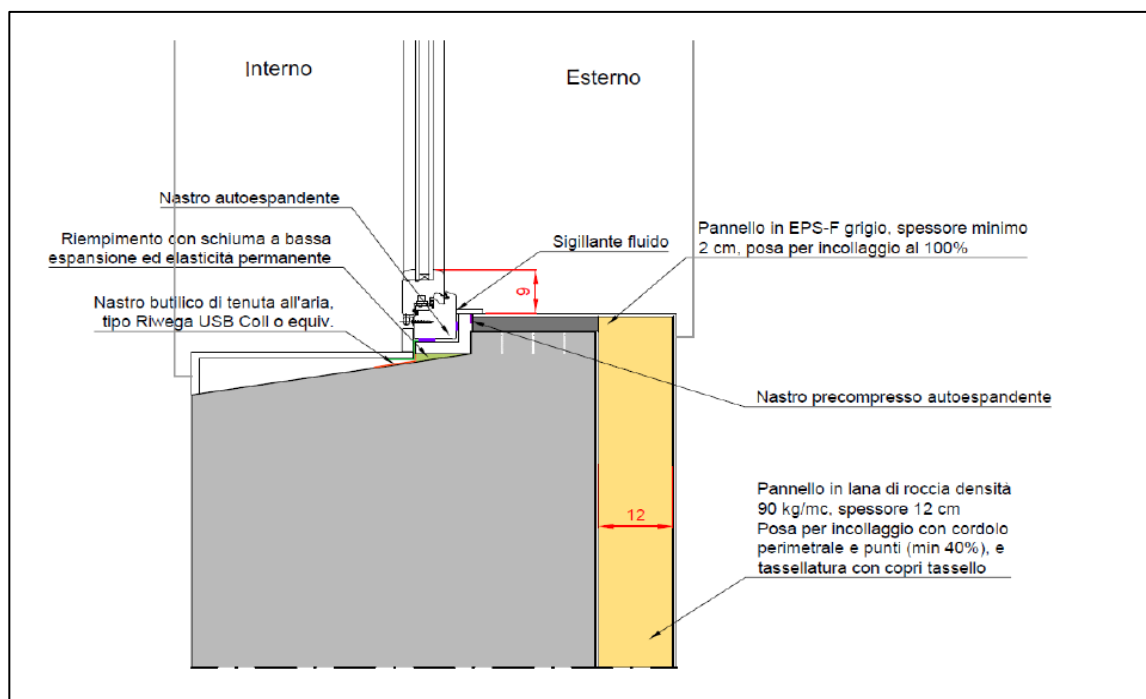
Per quanto riguarda i serramenti, quelli esistenti saranno sostituiti con nuovi serramenti in legno dotati di doppio vetro e vetrocamera isolante. I nuovi infissi si possono suddividere in tre tipologie:

1. su facciate rivolte verso il cortile interno (figure 3.2.4 e 3.2.5): saranno posate in continuità con l'isolamento termico esterno per effettuare la correzione del ponte termico sui quattro lati del telaio. Non sono presenti schermature solari esterni.



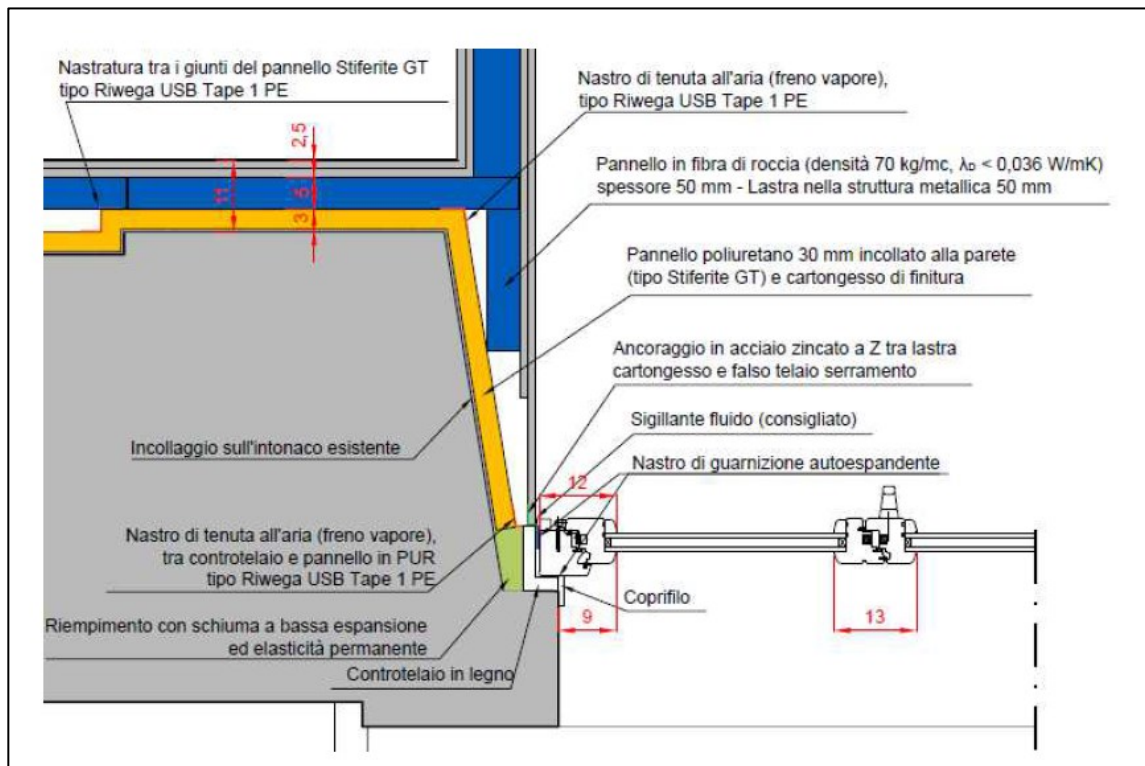
**Figura 3.2.4 – Rilievo fotografico –  
serramento facciata su cortile interno**





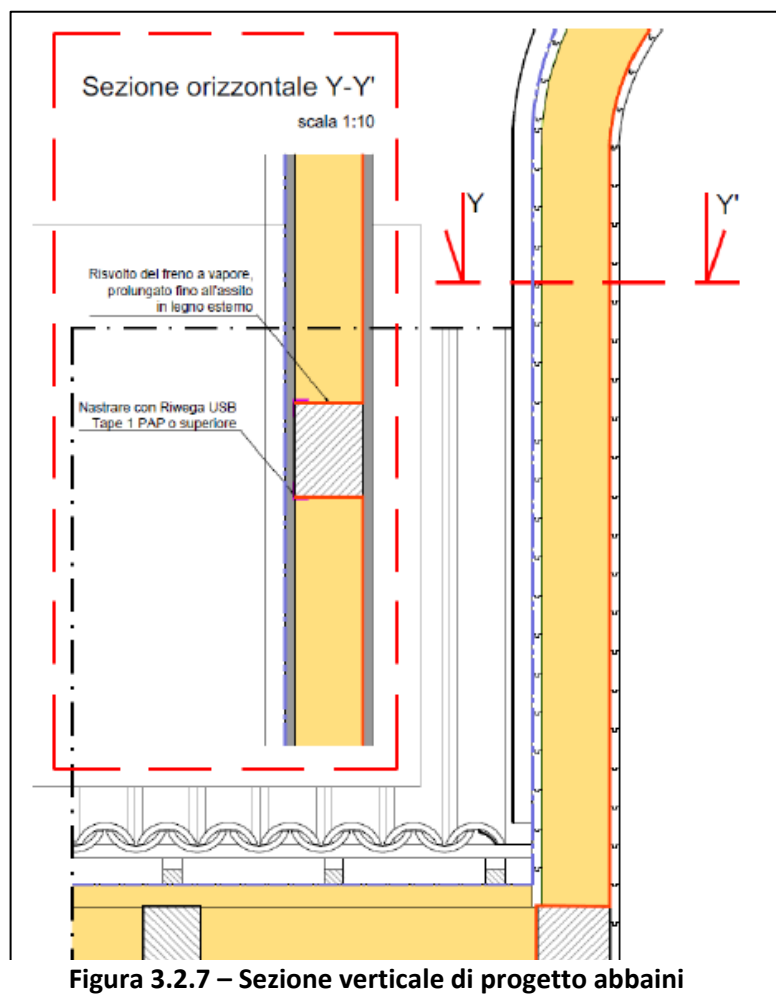
**Figura 3.2.5 – Sezione orizzontale di progetto dell'isolamento del serramento lato cortile**

2. Su facciate rivolte su Via Garibaldi e su Via Sant'Agostino (figura 3.2.6): saranno installati in continuità con l'isolamento termico applicato all'interno per garantire la correzione del ponte termico nell'imbotte interna del serramento. Davanti a tutti i serramenti sarà presente una schermatura solare mobile costituita da una persiana ad anta.



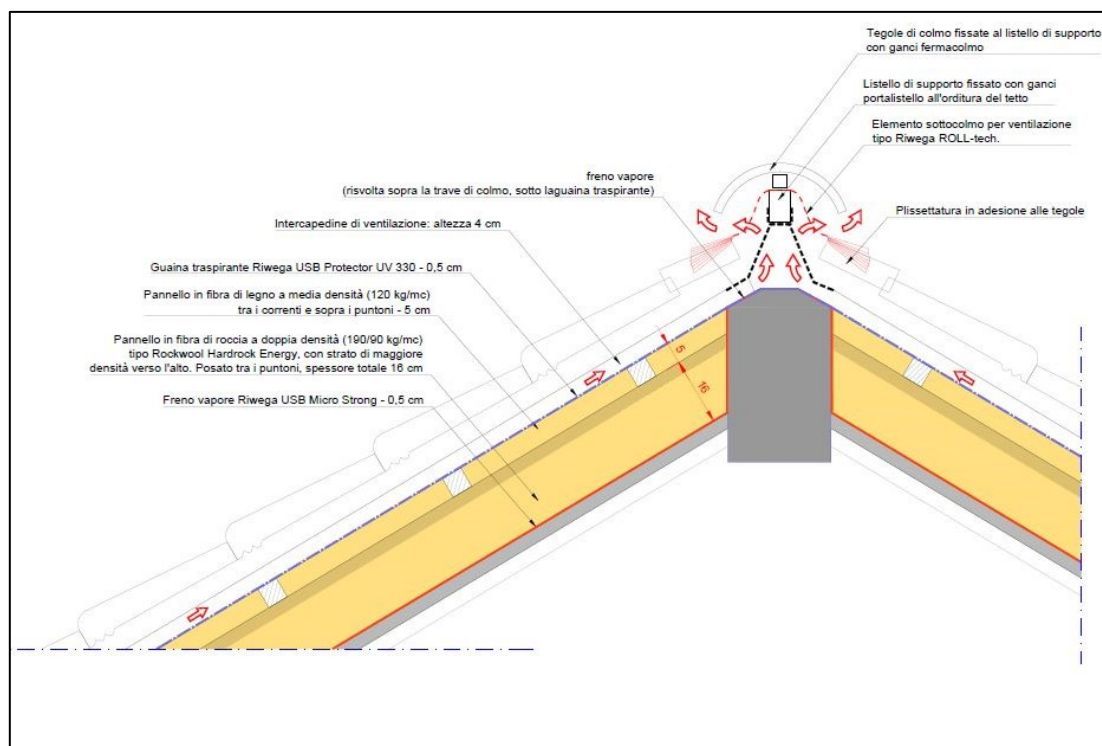
**Figura 3.2.6 – Sezione orizzontale di progetto per correzione ponte termico serramento su strade**

3. Abbaini: i serramenti saranno posati in continuità con l'isolante delle pareti e della copertura di ciascun abbaino e saranno schermati con persiane esterne ad anta su quelli rivolti su Via Garibaldi e su Via Sant'Agostino.



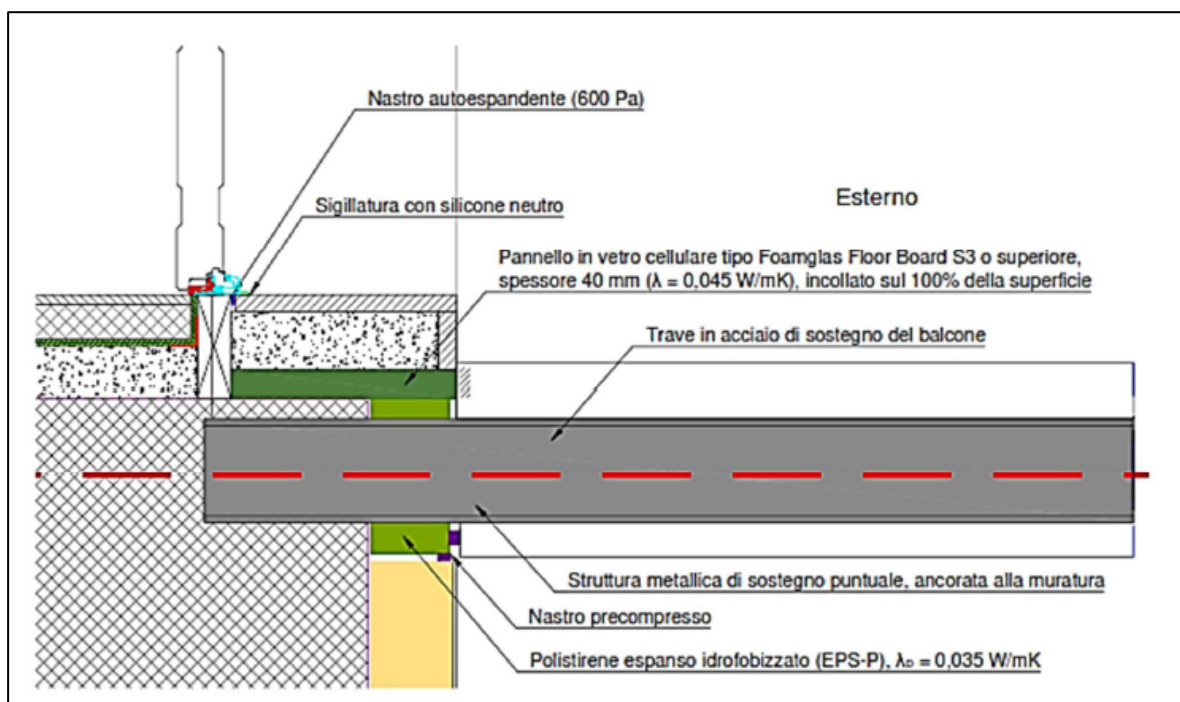
In riferimento all'isolante da porre in copertura dell'edificio oggetto di studio, si è pensato di adottare due tipologie di isolante. Il primo è costituito da lastre in fibra di legno, utilizzate per isolare il tetto a falde con struttura in legno, il secondo è composto da pannelli in polistirene estruso calpestabile battentato tipo Ttyrodur 4000CS di spessore 10 cm per quanto riguarda la copertura piana del volume tecnico. Si precisa che per la copertura a falde è stato deciso di eseguire il rifacimento completo e inoltre dovranno essere realizzati ventisei nuovi abbaini, isolati anch'essi con pannelli in fibra di roccia di spessore 14 cm. Sia la struttura della copertura a falde che la copertura degli abbaini saranno ventilate.

I solai intermedi tra ambienti riscaldati saranno isolati sopra il rustico mediante la posa di un sottofondo in calcestruzzo alleggerito, nel quale alloggiano gli impianti, e di un isolante acustico di spessore pari a 1,3 cm. I solai su ambienti non riscaldati, invece, saranno coibentati sopra il rustico mediante la posa di due pannelli isolanti in aerogel nanoporosi, rinforzati con fibre minerali con filamento continuo ad alta densità, con barriera al vapore. Sopra a questi due strati verrà gettato uno strato in calcestruzzo armato di spessore pari a 5,0 cm.



**Figura 3.2.8 – Particolare costruttivo copertura**

Infine, per quanto riguarda i balconi, la struttura orizzontale di ognuno di essi sarà sostenuta da una trave in acciaio che sarà ancorata alla muratura esistente. Il taglio termico, invece, dovrà essere realizzato mediante l'interposizione di un pannello in polistirene espanso idrofobizzato per una larghezza di 10 cm. Tutti i punti di contatto con le strutture metalliche saranno sigillati con nastro di guarnizione espandente impermeabile tipo ROFIX BG2 e il pannello isolante dovrà essere posato per tutta la larghezza del balcone, fino a contatto con l'anima delle travi di sostegno.



**Figura 3.2.9 – Sezione verticale di progetto balconi**

### 3.2.1 Descrizione dell'involucro di progetto

Di seguito si riportano le stratigrafie e le caratteristiche dei materiali costituenti le pareti e i solai di progetto.

- **Solai interpiano P1-P5:** rifacimento con struttura in acciaio

**Tabella 3.2.1.1 – Caratteristiche solaio interpiano P1-P5**

| Caratteristica                 | U.d.m                                   | valore       |  |
|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------|--|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,634</b> |  |
| Spessore                       | mm                                      | <b>425</b>   |  |
| Permeanza                      | 10 <sup>-12</sup> kg/sm <sup>2</sup> Pa | <b>0,010</b> |  |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup>                      | <b>305</b>   |  |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,088</b> |  |
| Fattore di attenuazione        | -                                       | <b>0,140</b> |  |
| Sfasamento                     | h                                       | <b>11,1</b>  |  |
|                                |                                         |              |  |
|                                |                                         |              |  |

**Tabella 3.2.1.2 – Stratigrafia solaio interpiano P1-P5**

| n. | Descrizione strato                                        | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] | μ<br>[-] |
|----|-----------------------------------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|----------|
| -  | Resistenza superficiale interna                           | -           | -               | 0,170                      | -                             | -             | -        |
| 1  | Legno di quercia flusso perpendicolare alle fibre         | 15          | 0,220           | 0,068                      | 850                           | 1,60          | 42       |
| 2  | Massetto in cls con rete                                  | 50          | 1,490           | 0,034                      | 2200                          | 0,88          | 70       |
| 3  | Isolamento acustico                                       | 13          | 0,105           | 0,124                      | 650                           | 1,30          | 5000     |
| 4  | Cls alleggerito autoclavato (350 kg/m <sup>3</sup> )      | 70          | 0,112           | 0,625                      | 350                           | 0,84          | 3        |
| 5  | Cls in genere                                             | 75          | 0,730           | 0,103                      | 1600                          | 1,00          | 96       |
| 6  | Acciaio                                                   | 2           | 52,00           | 0,000                      | 7800                          | 0,45          | 9999999  |
| 7  | Intercapedine non ventilata (Av < 500 mm <sup>2</sup> /m) | 185         | 0,825           | 0,224                      | -                             | -             | -        |
| 8  | Cartongesso in lastre                                     | 15          | 0,250           | 0,060                      | 900                           | 1,00          | 10       |
| -  | Resistenza superficiale esterna                           | -           | -               | 0,170                      | -                             | -             | -        |

#### Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica; **C**= Capacità termica specifica; **μ**= Fattore di resistenza alla diffusione del vapore.



- Solai su ambienti non riscaldati o esterni

Tabella 3.2.1.3 – Caratteristiche solaio su ambiente non riscaldato o esterni

| Caratteristica                 | U.d.m                                   | valore       |  |
|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------|--|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,285</b> |  |
| Spessore                       | mm                                      | <b>333</b>   |  |
| Permeanza                      | 10 <sup>-12</sup> kg/sm <sup>2</sup> Pa | <b>0,010</b> |  |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup>                      | <b>606</b>   |  |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,025</b> |  |
| Fattore di attenuazione        | -                                       | <b>0,089</b> |  |
| Sfasamento                     | h                                       | <b>13,6</b>  |  |

Superficie interna

Superficie esterna

Tabella 3.2.1.4 – Stratigrafia solaio su ambiente non riscaldato o esterni P5

| n. | Descrizione strato                                | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] | μ<br>[-] |
|----|---------------------------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|----------|
| -  | Resistenza superficiale interna                   | -           | -               | 0,170                      | -                             | -             | -        |
| 1  | Legno di quercia flusso perpendicolare alle fibre | 15          | 0,220           | 0,068                      | 850                           | 1,60          | 42       |
| 2  | Massetto in cls con rete                          | 50          | 1,490           | 0,034                      | 2200                          | 0,88          | 70       |
| 3  | Aerogel AL con film                               | 20          | 0,014           | 1,429                      | 200                           | 1,00          | 1000000  |
| 4  | Aerogel HP                                        | 20          | 0,014           | 1,429                      | 200                           | 1,00          | 13       |
| 5  | Isolamento acustico                               | 13          | 0,105           | 0,124                      | 650                           | 1,30          | 5000     |
| 6  | Caldana in cemento armato                         | 80          | 2,150           | 0,037                      | 2500                          | 0,88          | 100      |
| 7  | Volta in mattoni                                  | 120         | 0,900           | 0,133                      | 2000                          | 0,84          | 10       |
| 8  | Intonaco interno                                  | 15          | 1,000           | 0,015                      | 1800                          | 0,84          | 10       |
| -  | Resistenza superficiale esterna                   | -           | -               | 0,170                      | -                             | -             | -        |

Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica;  
**C** = Capacità termica specifica; **μ**= Fattore di resistenza alla diffusione del vapore.

- Parete su strada isolata dall'interno (M1)

Tabella 3.2.1.5 – Caratteristiche parete su strada (M1)

| Caratteristica                 | U.d.m                                   | valore        |  |
|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------|--|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,257</b>  |  |
| Spessore                       | mm                                      | <b>990</b>    |  |
| Permeanza                      | 10 <sup>-12</sup> kg/sm <sup>2</sup> Pa | <b>17,929</b> |  |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup>                      | <b>1793</b>   |  |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,000</b>  |  |
| Fattore di attenuazione        | -                                       | <b>0,001</b>  |  |
| Sfasamento                     | h                                       | <b>8,2</b>    |  |

Superficie esterna

20,00mm intonaco esterno(fuori scala)

850,00mm muratura in laterizio

15,00mm intonaco interno(fuori scala)

30,00mm Pannello rigido in poliuretano espanso Stiferite G.T.(fuori scala)

50,00mm Pannello rigido in lana di roccia(fuori scala)

12,50mm Lastra in gessofibra GyprocRigidur H(fuori scala)

12,50mm Lastra in Cartongesso(fuori scala)

Superficie interna

Tabella 3.2.1.6 – Stratigrafia parete su strada (M1)

| n. | Descrizione strato                                                | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] | μ<br>[-] |
|----|-------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|----------|
| -  | Resistenza superficiale interna                                   | -           | -               | 0,130                      | -                             | -             | -        |
| 1  | Lastra in cartongesso                                             | 12,5        | 0,250           | 0,050                      | 820                           | 1,10          | 10       |
| 2  | Lastra in gessofibra                                              | 12,5        | 0,202           | 0,062                      | 1200                          | 1,10          | 19       |
| 3  | Pannello rigido in lana di roccia (densità 70 kg/m <sup>3</sup> ) | 50          | 0,035           | 1,429                      | 70                            | 1,03          | 1        |
| 4  | Pannello in poliuretano espanso                                   | 30          | 0,024           | 1,250                      | 34                            | 1,30          | 148      |
| 5  | Intonaco interno                                                  | 15          | 1,000           | 0,015                      | 1800                          | 0,84          | 10       |
| 6  | Muratura in laterizio                                             | 850         | 0,990           | 0,859                      | 2000                          | 1,00          | 7        |
| 7  | Intonaco esterno                                                  | 20          | 0,750           | 0,027                      | 1800                          | 0,84          | 10       |
| -  | Resistenza superficiale esterna                                   | -           | -               | 0,071                      | -                             | -             | -        |

Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica; **C** = Capacità termica specifica; **μ**= Fattore di resistenza alla diffusione del vapore.

- Parete su corte interno con cappotto esterno (M3)

Tabella 3.2.1.7 – Caratteristiche parete su corte interna (M3)

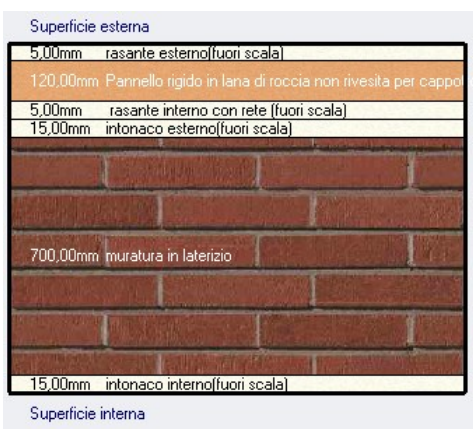
| Caratteristica                 | U.d.m                                   | valore        |  |
|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,233</b>  |                                                                                    |
| Spessore                       | mm                                      | <b>860</b>    |                                                                                    |
| Permeanza                      | 10 <sup>-12</sup> kg/sm <sup>2</sup> Pa | <b>36,900</b> |                                                                                    |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup>                      | <b>1483</b>   |                                                                                    |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,000</b>  |                                                                                    |
| Fattore di attenuazione        | -                                       | <b>0,002</b>  |                                                                                    |
| Sfasamento                     | h                                       | <b>3,6</b>    |                                                                                    |

Tabella 3.2.1.8 – Stratigrafia parete su corte interna (M3)

| n. | Descrizione strato                              | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] | μ<br>[-] |
|----|-------------------------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|----------|
| -  | Resistenza superficiale interna                 | -           | -               | 0,130                      | -                             | -             | -        |
| 1  | Intonaco interno                                | 15          | 1,000           | 0,015                      | 1800                          | 0,84          | 10       |
| 2  | Muratura in laterizio                           | 700         | 0,990           | 0,707                      | 2000                          | 1,00          | 7        |
| 3  | Intonaco esterno                                | 15          | 1,000           | 0,015                      | 1800                          | 0,84          | 10       |
| 4  | Rasante interno con rete                        | 5           | 0,750           | 0,007                      | 1800                          | 0,84          | 10       |
| 5  | Pannello in lana di roccia per cappotto esterno | 120         | 0,036           | 3,333                      | 90                            | 1,03          | 1        |
| 6  | Rasante esterno con rete                        | 5           | 0,750           | 0,007                      | 1800                          | 0,84          | 10       |
| -  | Resistenza superficiale esterna                 | -           | -               | 0,071                      | -                             | -             | -        |

Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica; **C** = Capacità termica specifica; **μ**= Fattore di resistenza alla diffusione del vapore.

- Parete abbaini (M7)

Tabella 3.2.1.9 – Caratteristiche parete abbaini (M7)

| Caratteristica                 | U.d.m                                   | valore        |  |
|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------|--|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,216</b>  |  |
| Spessore                       | mm                                      | <b>213</b>    |  |
| Permeanza                      | 10 <sup>-12</sup> kg/sm <sup>2</sup> Pa | <b>59,083</b> |  |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup>                      | <b>62</b>     |  |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K                      | <b>0,129</b>  |  |
| Fattore di attenuazione        | -                                       | <b>0,598</b>  |  |
| Sfasamento                     | h                                       | <b>7,7</b>    |  |

Superficie esterna

2,00mm Rame(fuori scala)

25,00mm Intercapedine non ventilata Av<500mq/m

8,00mm Guaina traspirante RIWEGA(fuori scala)

20,00mm Assito in legno- flusso perpend. alle fibre

150,00mm Pannello rigido in lana di roccia-densità 90 kg/mc

7,00mm Freno al vapore RIWEGA(fuori scala)

20,00mm Assito in legno- flusso perpend. alle fibre

Superficie interna

Tabella 3.2.1.10 – Stratigrafia parete abbaini (M7)

| n. | Descrizione strato              | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] | μ<br>[-] |
|----|---------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|----------|
| -  | Resistenza superficiale interna | -           | -               | 0,130                      | -                             | -             | -        |
| 1  | Assito in legno                 | 20          | 0,150           | 0,167                      | 550                           | 2,70          | 25       |
| 2  | Freno vapore                    | 0,34        | 0,350           | 0,002                      | 300                           | 2,10          | 3077     |
| 3  | Lana di roccia                  | 140         | 0,035           | 4,000                      | 90                            | 0,84          | 1        |
| 4  | Assito in legno                 | 20          | 0,150           | 0,133                      | 550                           | 2,70          | 25       |
| 5  | Guaina traspirante              | 0,80        | 0,350           | 0,002                      | 406                           | 2,10          | 150      |
| 6  | Intercapedine non ventilata     | 25          | -               | 0,180                      | -                             | -             | -        |
| 7  | Rame                            | 2,00        | 380,000         | -                          | 8900                          | 0,38          | -        |
| -  | Resistenza superficiale esterna | -           | -               | 0,071                      | -                             | -             | -        |

Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica;  
**C**= Capacità termica specifica; **μ**= Fattore di resistenza alla diffusione del vapore.

- Copertura in legno di nuova realizzazione

Tabella 3.2.1.11 – Caratteristiche solaio di copertura

| Caratteristica                 | U.d.m              | valore       |  |
|--------------------------------|--------------------|--------------|--|
| Trasmittanza termica           | W/m <sup>2</sup> K | <b>0,172</b> |  |
| Spessore                       | mm                 | <b>415</b>   |  |
| Massa superficiale             | kg/ m <sup>2</sup> | <b>81</b>    |  |
| Trasmittanza termica periodica | W/m <sup>2</sup> K | <b>0,019</b> |  |
| Fattore di attenuazione        | -                  | <b>0,109</b> |  |
| Sfasamento                     | h                  | <b>15,56</b> |  |

Tabella 3.2.1.12 – Stratigrafia solaio di copertura

| n. | Descrizione strato              | Sp.<br>[mm] | Cond.<br>[W/mK] | R.<br>[m <sup>2</sup> K/W] | M.V.<br>[kg/ m <sup>3</sup> ] | C<br>[kJ/kgK] | μ<br>[-] |
|----|---------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|----------|
| -  | Resistenza superficiale interna | -           | -               | 0,130                      | -                             | -             | -        |
| 1  | Assito in legno                 | 30          | 0,120           | 0,100                      | 450                           | 2,70          | 25       |
| 2  | Freno al vapore                 | 5           | 0,220           | 0,023                      | 217                           | 1,70          | 3077     |
| 3  | Pannello in lana di roccia      | 130         | 0,038           | 3,421                      | 175                           | 0,84          | 1        |
| 4  | Assito in legno                 | 30          | 0,120           | 0,100                      | 450                           | 2,70          | 25       |
| 5  | Pannello in fibra di legno      | 50          | 0,350           | 0,002                      | 200                           | 2,10          | 150      |
| 6  | Intercapedine d'aria            | 50          | -               | 0,180                      | -                             | -             | -        |
| 7  | Listelli                        | 30          | 0,120           | 0,100                      | 450                           | 2,70          | 25       |
| 8  | Tegole                          | 80          | 0,920           | 0,087                      | 30                            | 0,84          | 7        |
| -  | Resistenza superficiale esterna | -           | -               | 0,071                      | -                             | -             | -        |

Legenda simboli

**Sp.**=spessore; **Cond.**= Conduttività termica; **R.**= Resistenza termica; **M.V.**= Massa volumica; **C** = Capacità termica specifica; **μ**= Fattore di resistenza alla diffusione del vapore.

Come si evince dai calcoli della trasmittanza dei solai e delle pareti impiegate, tali valori rientrano tutti nei limiti imposti dalla normativa, in particolare agli Obiettivi dello Stralcio di Piano per il riscaldamento ambientale e il condizionamento (Attuazione L.R 13/2007), la quale impone che il valore della trasmittanza termica delle strutture edilizie di separazione tra edifici o unità immobiliari appartenenti allo stesso edificio deve essere inferiore a **0,8 W/m<sup>2</sup>K** nel caso di strutture opache divisorie verticali, orizzontali e inclinate. Tale valore viene imposto anche per le strutture che separano ambienti riscaldanti da ambienti non riscaldati, e nel caso in esame, le trasmittanze del solaio e della parete che separano gli alloggi dal vano scala, risultano essere inferiori.

### **3.2.2 Descrizione dell'impianto di progetto**

L'impianto termofluidico previsto da progetto è costituito da un sistema di riscaldamento e raffrescamento realizzato mediante l'idronica, ovvero mediante la trasmissione di calore tramite l'utilizzo dell'acqua come fluido termovettore. In seguito, verranno illustrati i vari sottosistemi che compongono l'impianto che si intende realizzare.

#### **3.2.2.1 Centrale termofrigorifera**

La centrale termofrigorifera realizzata ex novo garantisce la produzione dei fluidi freddi, caldi e sanitari a servizio dell'edificio oggetto di studio di proprietà Reale Immobili S.p.a. dei negozi di proprietà di terzi con affaccio su Via Garibaldi e del locale interrato al di sotto del cortile.

La centrale è stata realizzata nel terrazzo situato in copertura sulla falda lato cortile della manica di Via Sant'Agostino. Tale spazio è caratterizzato da una forte limitazione in altezza, per cui nella fase progettuale sono state adottate delle apparecchiature con un'altezza tale da evitare il superamento la quota di colmo della copertura, salvo per quanto riguarda i silenziatori di espulsione dei condensatori dei gruppi frigoriferi e le canne fumarie delle caldaie.

I lavori realizzati previsti da progetto consistono in:

- Installazione di un gruppo termico modulare costituito da due caldaie a condensazione alimentate a gas metano con potenza focolare di 92,9 kW cadauna, predisposizione di una terza caldaia di pari potenza, per una potenza totale di 185,8 kW considerando solo le due caldaie installate;
- Installazione di tre nuovi refrigeratori d'acqua condensati ad aria per una potenza totale di 151,2 kWf con condensatore remoto per il massimo contenimento degli spazi in altezza e contestualmente la riduzione delle emissioni sonore grazie all'inserimento di silenziatori e alla cofanatura delle moto condensanti. Per ogni gruppo frigorifero è stata prevista la realizzazione di un'idraulica di bordo macchina costituita da, per ciascun circuito evaporatore: un trasduttore di pressione differenziale scambiatore, un trasduttore di pressione differenziale filtro a Y, due trasduttori di temperatura, un misuratore di energia termica o frigorifera ad ultrasuoni con coppia di sonde, un integratore alimentato a 230V con modulo di comunicazione MODbus, un flussostato e una valvola di sicurezza.

- Installazione di nuovi collettori di mandata e di ripresa dell'acqua calda con partenze verso il circuito primario bollitori ACS e verso il circuito utenze, di diametro DN 100.
- Installazione di nuovi collettori di mandata e di ripresa dell'acqua calda/refrigerata DN 125 a servizio delle utenze residenziali e commerciali con tre pompe inverter in parallelo e funzionamento a cascata mediante comunicazione wireless compreso di misurature di energia ad ultrasuoni sulla partenza verso le utenze. Circuito con funzionamento invernale in caldo ed estivo in freddo.
- Installazione di nuovi collettori di mandata e di ripresa dell'acqua refrigerata DN 125 a servizio delle utenze commerciali con tre pompe inverter in parallelo e funzionamento a cascata mediante comunicazione wireless compreso di misurature di energia ad ultrasuoni sulla partenza verso le utenze. Circuito con funzionamento da marzo a novembre, al fine di fornire acqua refrigerata alle unità commerciali anche nelle mezze stagioni.
- Installazione di nuovi collettori di mandata e di ripresa dell'acqua refrigerata DN 160 a servizio del circuito primario dei gruppi frigoriferi con accumulo inerziale provvisto di tubi diffusori specifico per acqua refrigerata, con funzione di compensazione idraulica.
- Realizzazione della sezione di produzione ACS costituita da tre accumuli da 850 lt in serie, realizzati con altezza ridotta pari a 1,50 m. a causa del limitato spazio a disposizione è stato realizzato un isolamento unico che avvolge i tre serbatoi di spessore pari a 200 mm. Nello specifico, i primi due accumuli sono provvisti di serpentino ad immersione dedicato all'impianto solare termico e l'ultimo accumulo è servito da un produttore ACS esterno costituito da scambiatore di calore a piastre alimentato ad acqua calda.
- Installazione del sistema di miscelatore ACS ricircolo con pompa intelligente con funzione di autoapprendimento e trattamento termico per la gestione della legionella.
- Realizzazione dell'impianto solare termico costituito da quindici pannelli solari piani con assorbitore selettivo e con isolamento termico speciale in resina melamminica adatti per il funzionamento con angolazione di 10°. Tali pannelli sono stati posizionati in una struttura metallica apposita, realizzata in copertura del terrazzo tecnico, disposti su tre file. Il sistema è completo di gruppo di ritorno con valvola a tre vie con doppio ritorno sistema di espansione e misuratore di energia.

Le dorsali di distribuzione si dipartono quindi dalla centrale termofrigorifera e seguono un breve tracciato all'intradosso della copertura ed entrano in un cavedio verticale, ad ogni piano si staccano i rami orizzontali con transito nel controsoffitto o sotto pavimento dei corridoi di distribuzione per l'alimentazione delle unità immobiliari.

Per quanto riguarda l'alimentazione del gas metano alla centrale termica, invece, è stata prevista l'installazione di una nuova rete seguendo le indicazioni riportate nel D.M. 12.04.1996 in materia di impianti gas metano per potenze al focolare superiori ai 35 kW. L'alimentazione è derivata da apposito contatore posizionata all'esterno del fabbricato su Via S. Agostino, chiuso da una porta metallica provvista di griglia metallica forata. La tubazione in acciaio saldato parte dal contatore e percorre il muro esterno per il primo

tratto e poi transita a soffitto del piano -1 in apposita guaina metallica fino al cortile interno, dal quale poi sale parallelo al vano ascensore fino in copertura per alimentare la caldaia posta sul locale tecnico.

### 3.2.2.2 Impianto di climatizzazione

L'impianto pensato per il riscaldamento e il raffrescamento a servizio delle unità residenziali, è costituito da quattro sistemi:

- Ventilconvettori canalizzabili a due tubi con motori inverter ECM posizionati in nicchie sottofinestra, completi di valvole modulanti del tipo "pressure independent". Tale sistema è composto da canalizzazioni di mandata, bocchette di mandata ad alta induzione con griglia estetica microforata, portafiltro integrato sul ventilconvettore e sportello apribile grigliata in legno stratificato (figura 3.2.2.2.1);

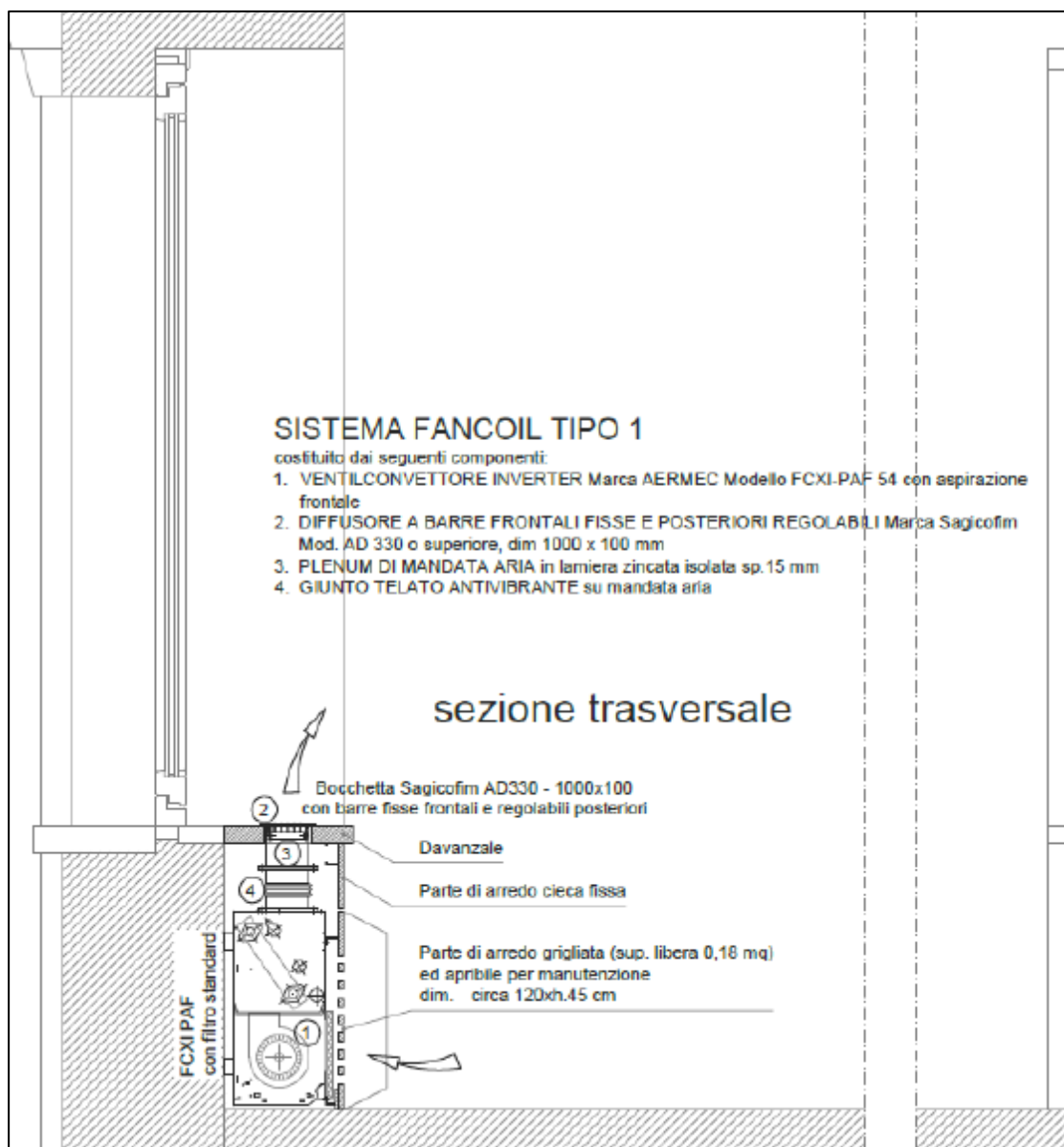


Figura 3.2.2.2.1: particolare sistema fancoil tipo 1



- Ventilconvettori canalizzati a due tubi con motori inverter ECM posizionati nel controsoffitto degli alloggi, completi di valvole modulanti del tipo “pressure independent”. Il sistema è costituito da canalizzazioni di mandata, bocchette di mandata ad alta induzione con griglia estetica microforata, portafiltro integrato sul ventilconvettore e botola apribile grigliata in legno stratificato (figura 3.2.2.2.2);
- Ventilconvettori canalizzabili a due tubi con motori inverter ECM posizionati in nicchie a parete, completi di valvole modulanti del tipo “pressure independent”. Il sistema è completo di canalizzazioni di mandata, bocchette di mandata a barre frontali fisse e posteriori regolabili, portafiltro integrato sul ventilconvettore, sportello apribile e zoccolino arretrato per la ripresa dell’aria. (figura 3.2.2.2.3);
- Ventilconvettori canalizzati a due tubi con motori inverter ECM posizionati nel controsoffitto degli alloggi, completi di valvole modulanti del tipo “pressure independent”. Tale sistema comprende le canalizzazioni di mandata e di ripresa, bocchette di mandata ad alta induzione con griglia estetica microforata, griglia di ripresa aria con portafiltro e filtro con medesima estetica della mandata (figura 3.2.2.2.4).

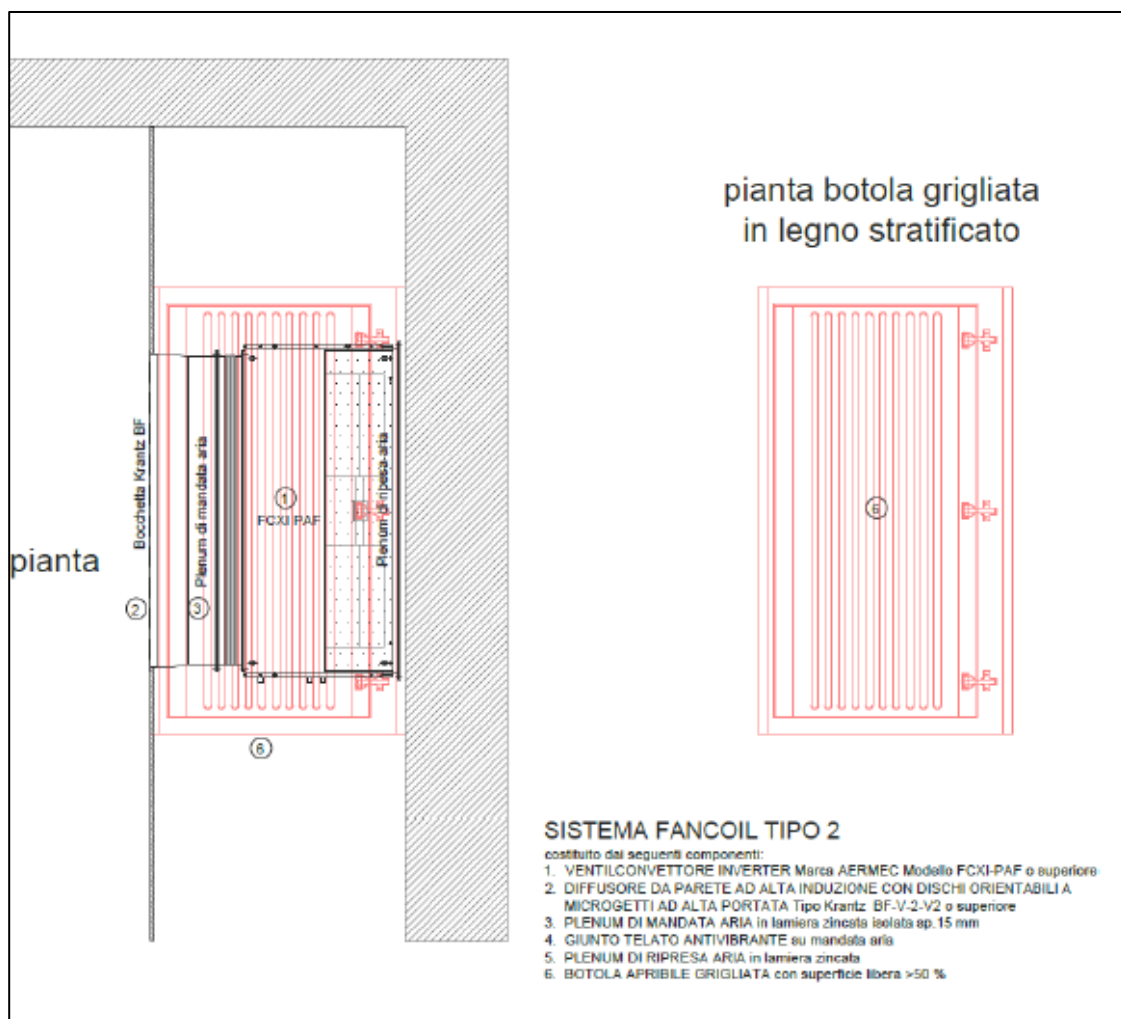


Figura 3.2.2.2.2: particolare sistema fancoil tipo 2

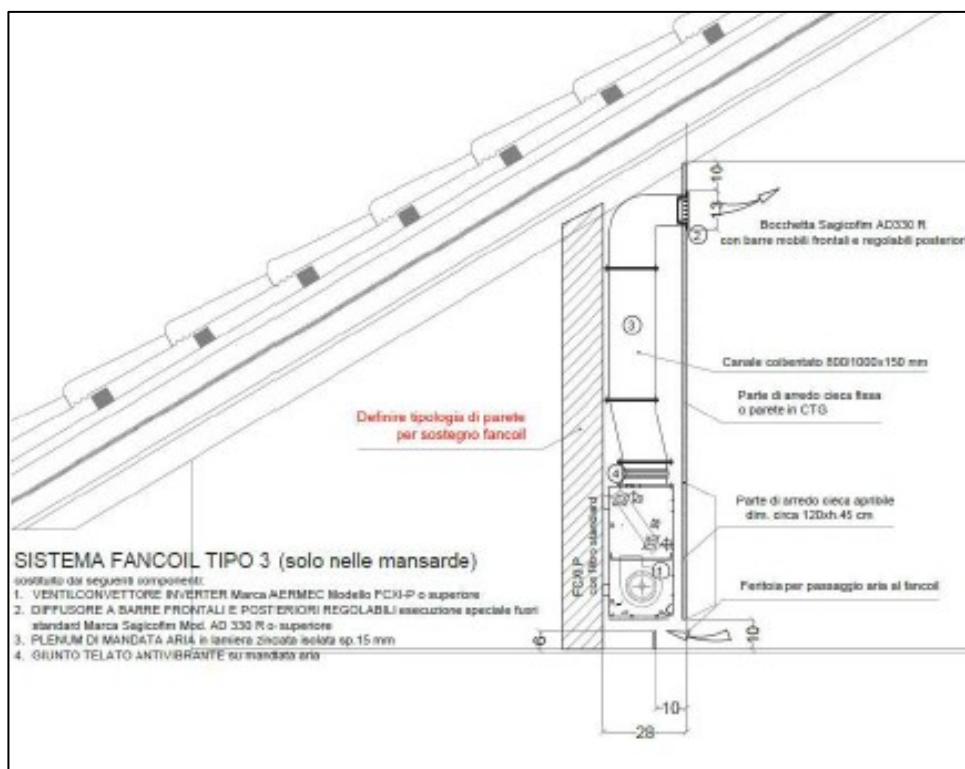


Figura 3.2.2.2.3: particolare sistema fancoil tipo 3

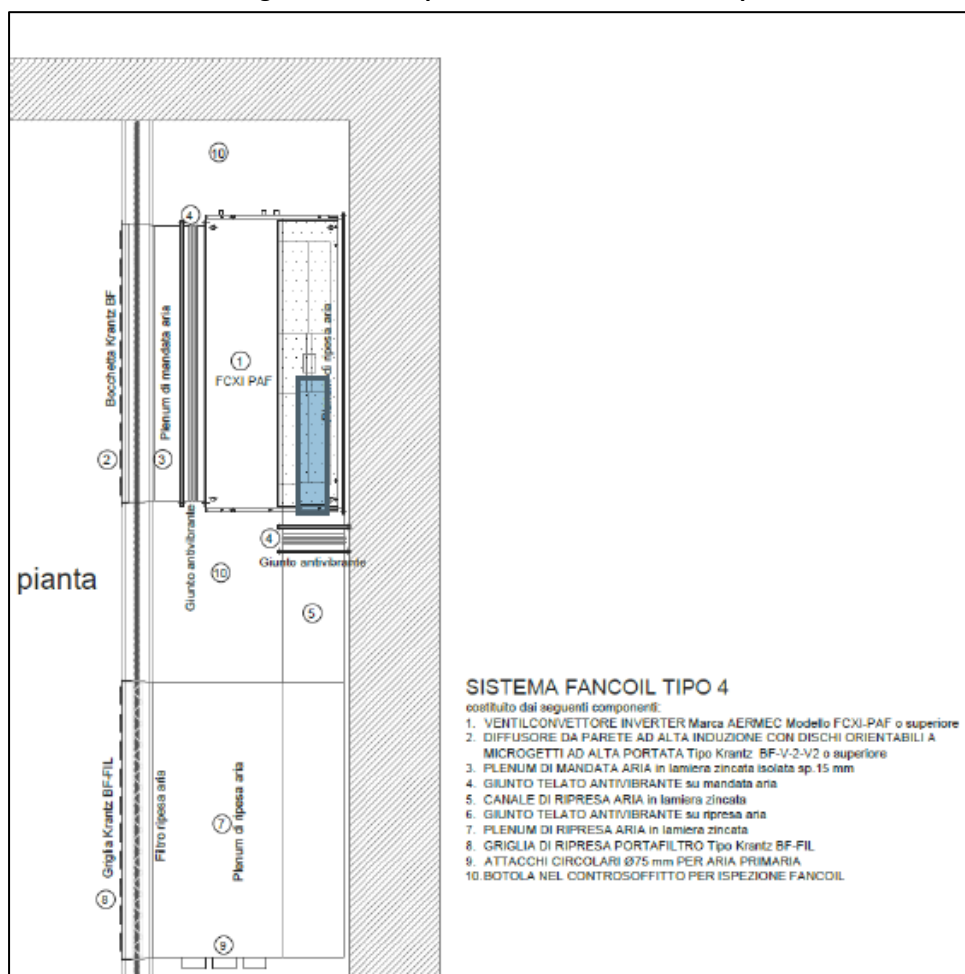


Figura 3.2.2.2.4: particolare sistema fancoil tipo 4

Il progetto prevede anche la posa di una rete separata per la raccolta delle condense dei ventilconvettori raccordata alla linea di scarico acque nere, prevedendo l'interposizione di un doppio sifone con alto contenuto d'acqua, onde evitare l'evaporazione durante i mesi di inutilizzo dell'impianto di condizionamento. Tale rete è stata realizzata in polietilene ad alta densità PE-HD.

Per quanto riguarda il riscaldamento dei servizi igienici, invece, il sistema è costituito da radiatori a piastra in acciaio.

### 3.2.2.3 Impianto idrico sanitario

La centrale idrica è il locale in cui si attesta l'alimentazione idrica dell'acqua potabile proveniente dall'acquedotto pubblico. Tale locale è stato ricavato al piano -1 in fondo al deposito biciclette. Le opere realizzate consistono in:

- Installazione di un tronchetto a valle del contatore composto da riduttore di pressione, valvola unidirezionale e filtro di sicurezza;
- Installazione di un gruppo di addolcimento con serbatoio Sali;
- Installazione di un sistema di trattamento dell'acqua per circuiti chiusi con due gruppi di carico automatico a valle, per il carico dei circuiti acqua calda e acqua calda/refrigerata;
- Realizzazione del sistema di svuotamento, raccolta e scarico del fluido dei circuiti acqua calda e acqua calda/refrigerata attraverso tubazioni in multistrato collegate ai piedi di ciascuna colonna, idonee sia per il carico che per lo scarico;
- Installazione di un sistema di trattamento dell'acqua potabile con fosfosilicati alimentati.

Dalla centrale idrica parte la nuova rete di distribuzione dei fluidi termovettori caldi e freddi, in particolare quattro tubi per l'acqua calda e fredda sanitaria e tre per il ricircolo. Sono state posate nuove colonne verticali per tutta l'altezza dell'edificio, complete di punti fissi e scorrevoli. È stato posto un isolamento di spessore superiore alle prescrizioni del DPR 412/93 al fine di limitare al massimo le dispersioni termiche. Ogni due piani il cavedio è stato sigillato al fine di evitare qualsiasi movimento d'aria per effetto camino tra tubazioni e tubazioni e tra tubazioni e manufatti edili. È stato installato un sistema bypass tra mandata e ritorno del circuito termovettore con valvola di bilanciamento con flussometro e valvola di bypass differenziale regolabile, un sistema di valvole e dispositivi per lo sfogo aria automatico e manuale in testa colonna, una coppia di ammortizzatori di colpo d'ariete per acqua sanitaria e lo stacco della tubazione di ricircolo della tubazione ACS. Per ogni unità immobiliare sono stati eseguiti gli stacchi al piano, terminanti con un set di quattro valvole di intercettazione per ogni satellite d'utenza degli appartamenti. Le reti interne agli alloggi sono state eseguite con tubazioni in materiale metalplastico multistrato, protette con isolante a celle chiuse spessore  $\geq 6$  mm per quelle fredde e di spessore di categoria B secondo il DPR 412/93 quelle calde. Tali tubazioni corrono a pavimento e in traccia a parete per alimentare ogni singolo apparecchio. Tutte le lavatrici e le lavastoviglie sono state alimentate sia con acqua fredda che con acqua calda, mentre su tutti i rubinetti e docce sono state installate diverse tipologie di rompigetto aerati.

### 3.2.2.4 Impianto aeraulico

Per quanto riguarda l'impianto aeraulico a servizio degli appartamenti, è stato previsto un sistema composto da un ventilatore cassonato installato nel controsoffitto di ciascun locale dei servizi igienici, da una serie di canalizzazioni e da bocchette per l'estrazione dell'aria dai locali serviti, al fine di una corretta estrazione dai bagni e dalle cucine e garantendo la portata d'aria in conformità alla norma UNI 10339 per ambienti ad uso residenziale. Il ventilatore, in particolare, è provvisto di due velocità: la prima (max) è collegata all'accensione dell'illuminazione di ogni bagno, mentre la seconda (min) è in servizio continuativo non spegnibile.

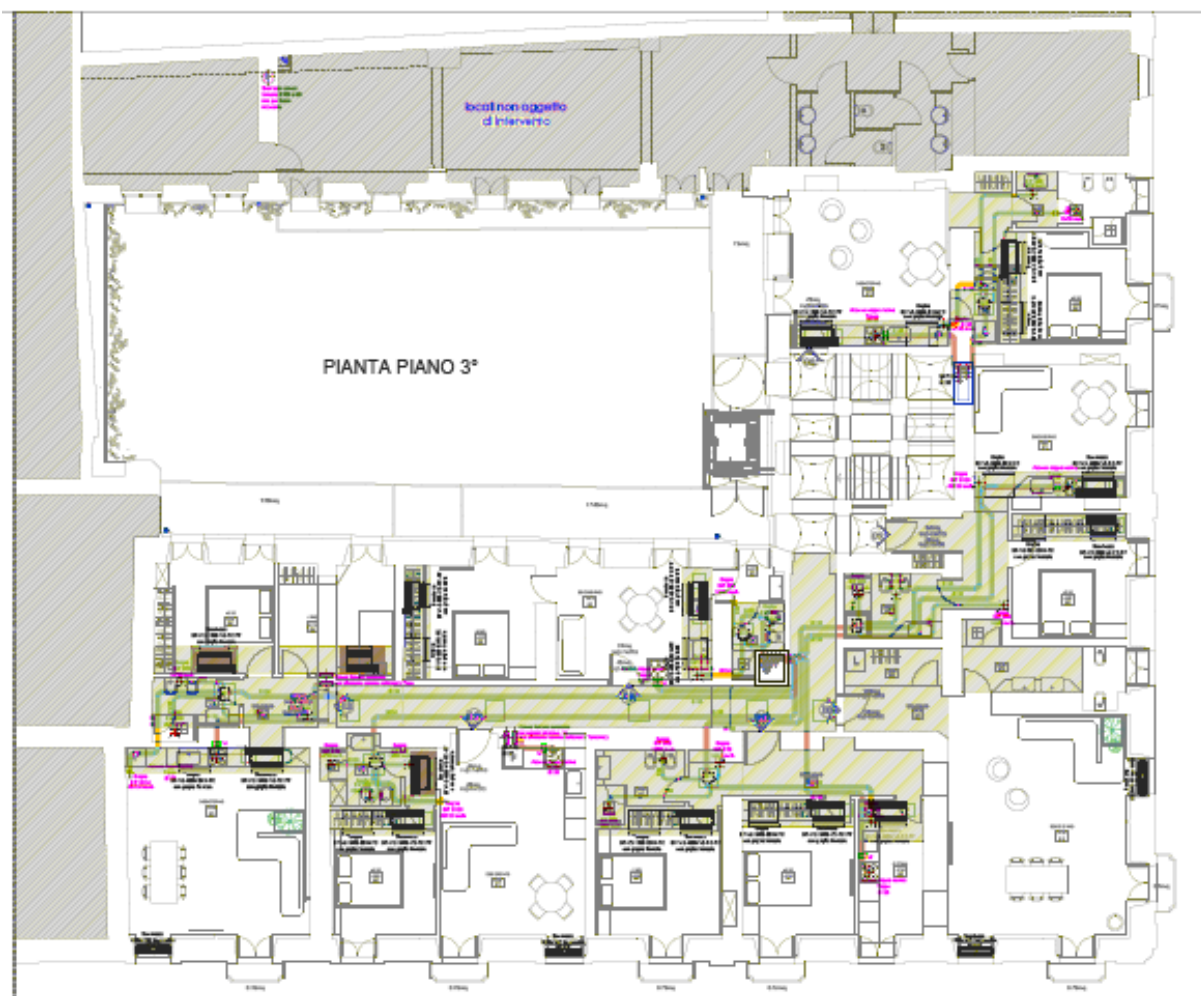


Figura 3.2.2.4.1: impianto aeraulico-piano 3

## 3.3 Valutazione economica

In questo paragrafo viene affrontato il tema relativo alla valutazione economica delle opere da realizzare descritte in precedenza. Il costo complessivo dell'intervento è stato ricavato mediante la stesura di un computo metrico estimativo. Per quanto riguarda i prezzi unitari applicati, per le voci relative alle opere edili, sono stati applicati i prezzi forniti dal Prezziario della regione Piemonte; per quanto concerne gli impianti termomeccanici, invece, sono stati utilizzati i prezzi delle offerte economiche richieste ai fornitori. Per gli impianti elettrici, invece, si è fatto riferimento ad un preventivo di un'impresa della provincia di Torino.

Poiché il computo metrico estimativo richiederebbe una trattazione a parte, di seguito si riporta direttamente la tabella riepilogativa dei costi suddivisa nelle macro voci di intervento.

Tabella 3.3.1: Costo totale di ristrutturazione

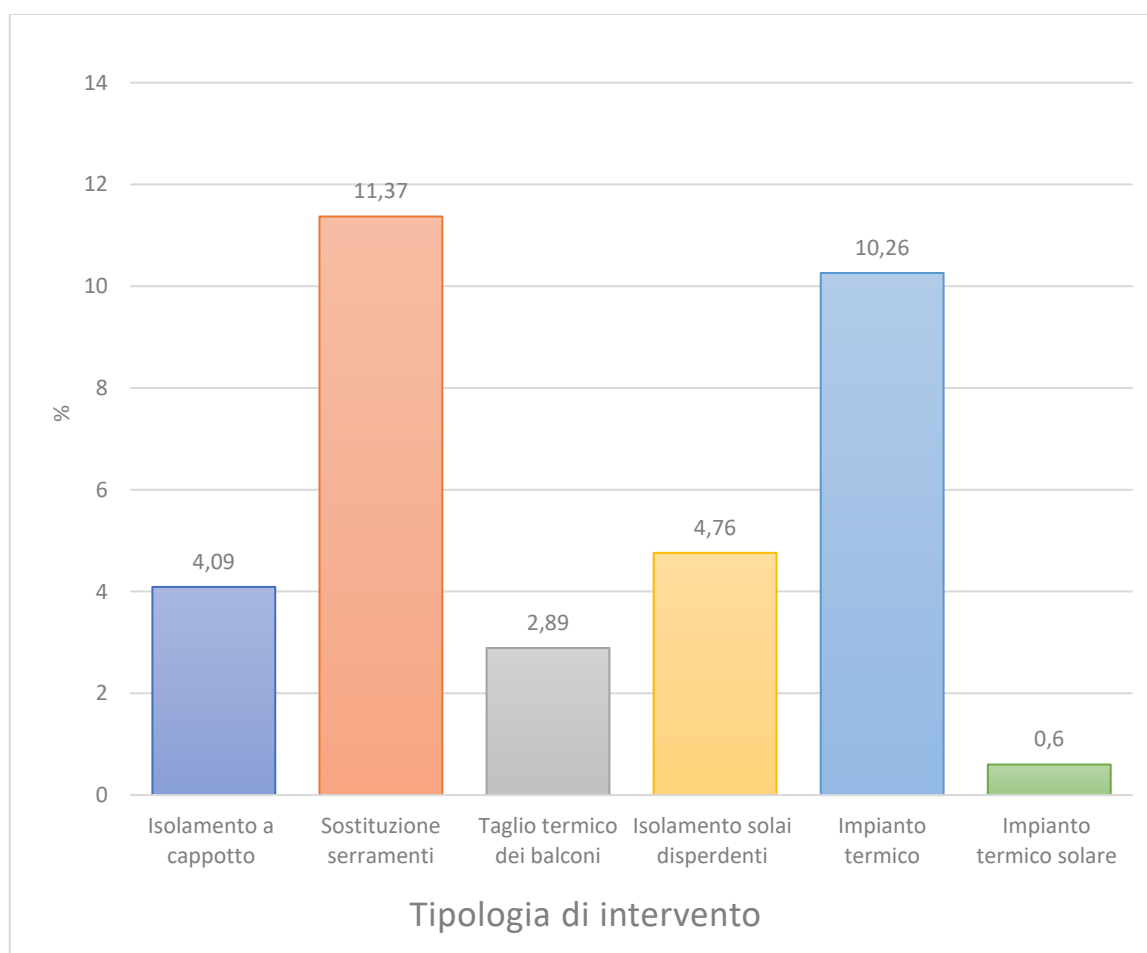
| Voce                    | Costo                 |
|-------------------------|-----------------------|
| Opere architettoniche   | € 1'699'977,70        |
| Opere strutturali       | € 564'688,69          |
| Impianti termomeccanici | € 585'095,85          |
| Impianti elettrici      | € 230'605,22          |
| <b>Costo totale</b>     | <b>€ 3'080'367,46</b> |

Successivamente, per osservare la percentuale di incidenza del costo di ciascuna tipologia di intervento, è stato eseguito un foglio di calcolo Excel, in cui sono state riportate le lavorazioni per ogni singola macro categoria con i relativi costi di realizzazione, ottenendo così le incidenze per ognuna di esse.

Tabella 3.3.2: Incidenza percentuale del costo delle singole lavorazioni

| Tipologia intervento    | Descrizione                                           | costo [€]             | Incidenza [%]  |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|----------------|
| opere strutturali       | opere provvisoriale                                   | € 8.698,98            | 0,28%          |
|                         | demolizioni e rimozioni                               | € 24.785,52           | 0,80%          |
|                         | scavi e rinterri                                      | € 1.839,27            | 0,06%          |
|                         | interventi strutturali                                | € 429.121,35          | 13,93%         |
|                         | rifacimento solaio                                    | € 83.109,49           | 2,70%          |
|                         | solaio tecnico in copertura                           | € 17.134,08           | 0,56%          |
| opere architettoniche   | allestimento cantiere                                 | € 91.692,92           | 2,98%          |
|                         | demolizioni                                           | € 23.530,45           | 0,76%          |
|                         | vespai-sottofondi impermeabilizzazioni                | € 63.476,63           | 2,06%          |
|                         | partizioni interne - controsoffitti - soffitti        | € 223.738,92          | 7,26%          |
|                         | sistema di elevazione                                 | € 64.836,48           | 2,10%          |
|                         | isolanti                                              | € 126.063,84          | 4,09%          |
|                         | pavimenti-rivestimenti-soglie                         | € 146.724,33          | 4,76%          |
|                         | serramenti                                            | € 350.123,95          | 11,37%         |
|                         | restauro facciate esterne e vano scala                | € 1.086,67            | 0,04%          |
|                         | intonaci interni - tinteggiature - finiture           | € 119.861,80          | 3,89%          |
|                         | balconi                                               | € 89.174,12           | 2,89%          |
|                         | opere in ferro                                        | € 41.373,74           | 1,34%          |
|                         | opere in vetro                                        | € 26.901,33           | 0,87%          |
|                         | opere di ornamento                                    | € 167.598,42          | 5,44%          |
|                         | opere accessorie                                      | € 163.794,10          | 5,32%          |
| Impianti elettrici      | opere elettriche                                      | € 230.605,22          | 7,49%          |
| Impianti termomeccanici | impianto termico                                      | € 139.160,30          | 4,52%          |
|                         | impianto idrico sanitario                             | € 94.220,69           | 3,06%          |
|                         | impianto aeraulico                                    | € 17.796,21           | 0,58%          |
|                         | impianto termico parti comuni                         | € 176.711,24          | 5,74%          |
|                         | impianto idrico sanitario parti comuni                | € 71.089,58           | 2,31%          |
|                         | impianto scarico acque nere                           | € 10.280,96           | 0,33%          |
|                         | Impianto gas centrale tecnologiche                    | € 4.583,41            | 0,15%          |
|                         | impianto di termoregolazione e supervisione BMS e CTF | € 52.860,80           | 1,72%          |
|                         | impianto solare                                       | € 18.392,66           | 0,60%          |
| <b>Totale</b>           |                                                       | <b>€ 3.080.367,46</b> | <b>100,00%</b> |

Osservando la tabella 3.3.2, in particolar modo le lavorazioni relative alla riqualificazione energetica dell'involucro, si può notare che l'incidenza maggiore è quella riguardante alla sostituzione di tutti i serramenti esistenti (11,37 %). Per quanto riguarda le altre opere che si intendono realizzare per ridurre i fabbisogni di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento, si può notare che la fornitura e la posa in opera dell'isolante per la realizzazione del cappotto interno ed esterno, invece, l'incidenza percentuale del relativo costo risulta essere pari al 4,09 %; la realizzazione del taglio termico dei balconi ricopre una percentuale del 2,89%; l'incidenza del costo per eseguire l'isolamento dei solai inferiori disperdenti è invece pari al 4,76%. Per quanto riguarda gli impianti tecnologici, si può osservare che l'impianto termico per gli alloggi ricopre una percentuale di incidenza pari al 4,52% sul costo totale dell'intervento; tale percentuale sommata a quella relativa all'incidenza dell'impianto termico delle parti comuni arriva ad una percentuale totale del 10,26%. Interessante notare come l'impianto termico solare incida solo dello 0,60% sul costo totale di ristrutturazione.



**Grafico 3.3.1: Incidenza percentuale del costo delle lavorazioni ai fini della riqualificazione energetica**

## Capitolo 4- Il modello di calcolo dinamico: Design Builder

### 4.1 Il software

L'analisi energetica dinamica dell'edificio oggetto di studio, è stato effettuato mediante Design Builder, un software che permette di calcolare in modo dettagliato i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento, le dispersioni termiche, i guadagni termici e andando ad analizzare anche il confort termoigrometrico interno. Grazie a questo software è possibile disegnare in 3D il modello dell'edificio e di attribuirgli le caratteristiche fisiche e termiche, come ad esempio le dimensioni dei vani che lo compongono, i materiali che caratterizzano i componenti opachi e trasparenti e dal punto di vista impiantistico permette di definire diverse tipologie di sistemi per il riscaldamento invernale, il condizionamento estivo e il sistema di ventilazione. Sviluppato da Design Builder Software, garantisce un'interfaccia completa per il software di calcolo "EnergyPlus", creato dall'U.S Department of Energy, simulando contemporaneamente l'ambiente esterno e l'impianto di climatizzazione. In questo caso di studio è stata utilizzata l'ultima versione rilasciata 5.0.3.007; tale versione presenta una serie di nuove funzionalità e miglioramenti rispetto alla precedente v4, e inoltre importanti novità per i moduli HVAC, ottimizzazione, analisi dei costi e modellazione.

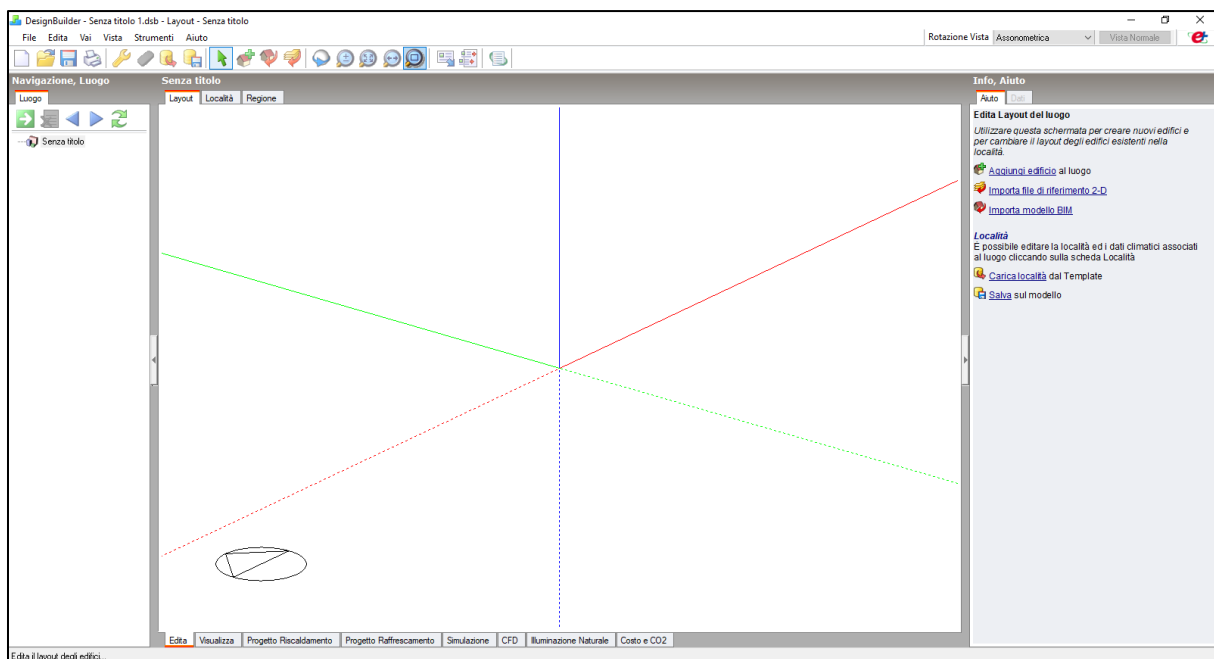


Figura 4.1.1: Design Builder, schermata iniziale

### 4.2 La modellazione

Grazie Design Builder è possibile realizzare il modello dell'edificio oggetto di studio tramite il disegno di "blocchi" che corrispondono ad uno spazio tridimensionale; ogni blocco, a sua volta, è suddiviso in "zone", ossia ambienti con diverse caratteristiche termiche, ciascuna delle



quali definita dalle superfici che la delimitano. Ad ogni superficie viene assegnata una stratigrafia, la quale è realizzata mediante l'accorpamento degli strati dei diversi materiali.

In alternativa è possibile importare un modello 3D in formato .gbXML realizzato mediante un altro software di modellazione.

Per ogni zona, inoltre, occorre definire il comportamento dell'utenza in termini di profili di occupazione, portate di ventilazione, profili di funzionamento di terminali elettrici e corpi illuminanti, oltre alle condizioni termo igrometriche che si vogliono garantire.

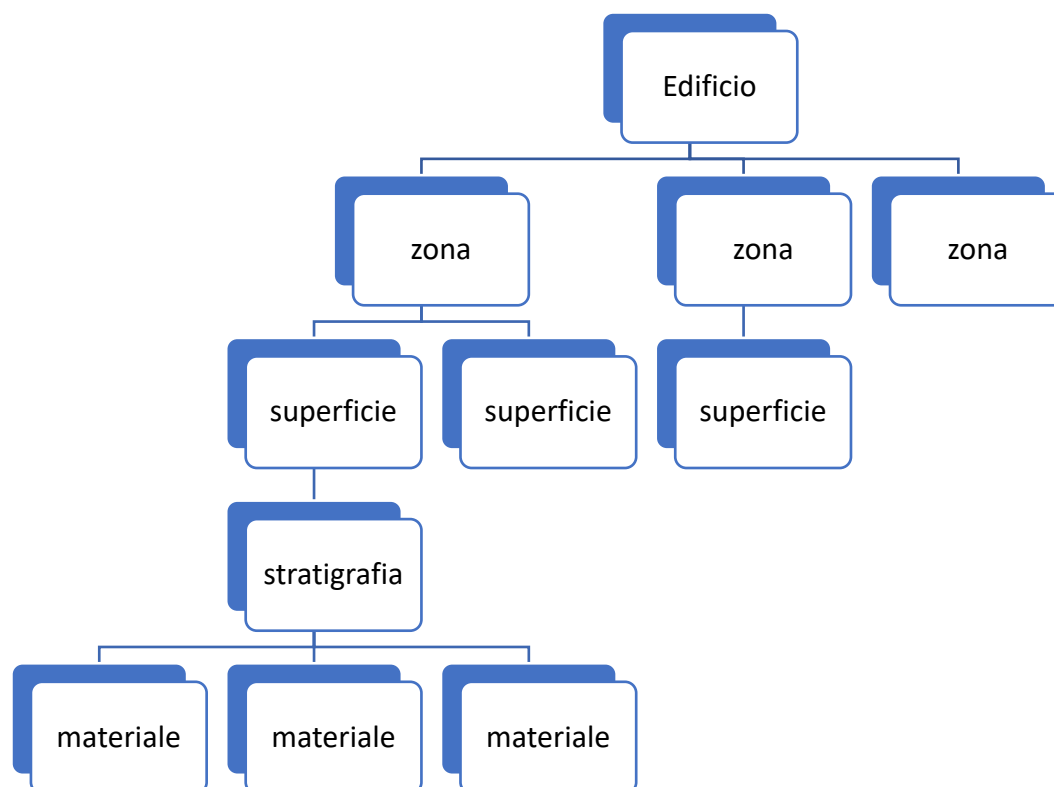


Figura 4.2.1: schema di modellazione edificio

Per quanto concerne la modellazione delle porte e delle finestre, tali oggetti sono considerati “sottosuperfici” degli elementi opachi che li contengono. Per la realizzazione delle superfici ombreggianti, invece, occorre selezionare “superfici non termiche”. In questo modo il software considera solo gli effetti di ombreggiamento che queste superfici generano sulle superfici termiche. Definita la geometria delle varie superfici e sottosuperfici che compongono l'intero involucro edilizio, l'attenzione viene posta alle proprietà di questi elementi.

### 4.3 Input del programma

Ultimata la modellazione del fabbricato, è necessario definire la localizzazione del contesto in cui esso è collocato; tramite il pannello “località” si imposta il template, ovvero il modello della località, le coordinate geografiche, i dati climatici e alcuni dati geomorfologici del sito, come ad esempio la quota sul livello del mare, l'esposizione al vento, ecc. Tutti questi dati, una volta impostata la località, vengono inseriti automaticamente dal software tenendo in considerazione i dati meteorologici dell'anno tipo contenuti nel database di EnergyPlus.



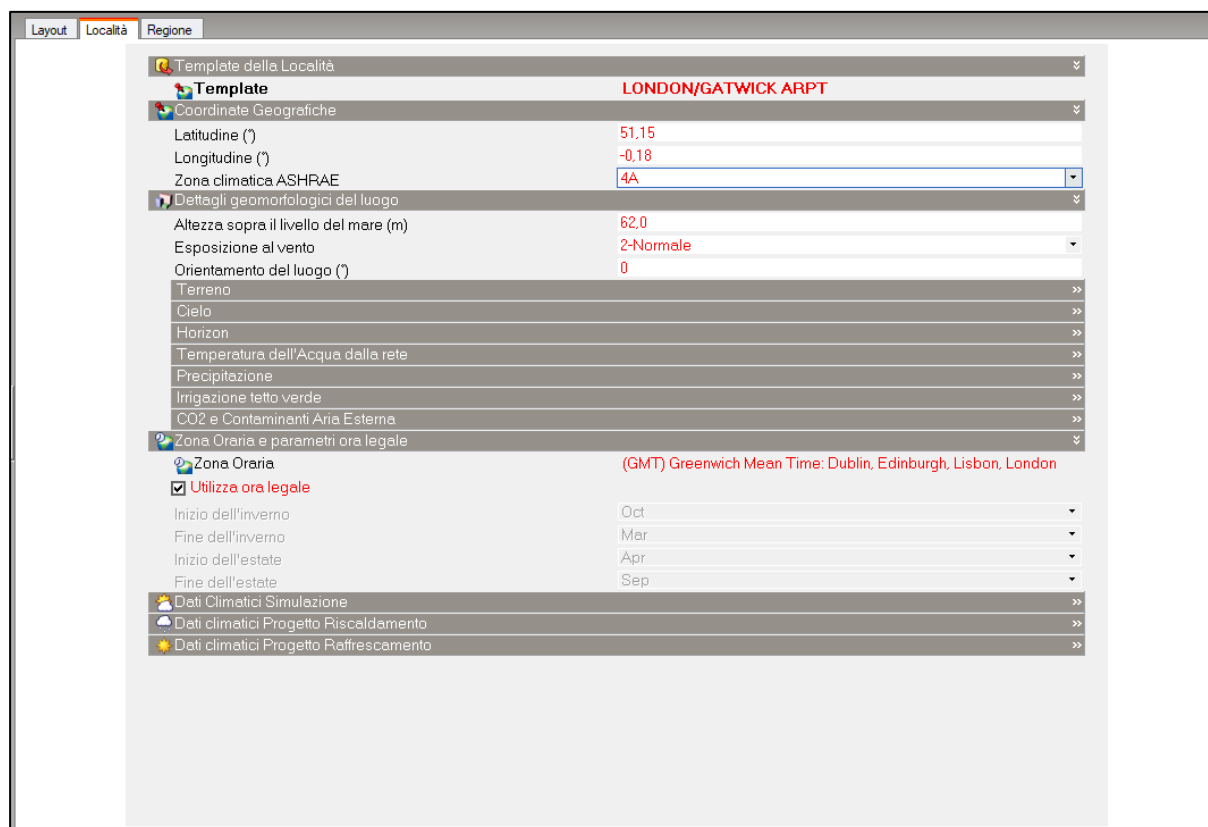


Figura 4.2.1: Design Builder, pannello Località

Successivamente si impostano i parametri richiesti dai pannelli “Attività”, “Costruzioni”, “Aperture”, “Illuminazione”, “HVAC” e “CFD”. Per ognuno di questi pannelli è possibile caricare i vari template presenti nella libreria di EnergyPlus oppure, crearne di nuovi in alternativa.

- Pannello “Attività”: in questa scheda si possono definire il tasso di occupazione espresso in persone/m<sup>3</sup>, e le azioni svolte all’interno della zona termica selezionata. È richiesto inoltre di inserire il tasso di consumo di ACS, le temperature di setpoint di riscaldamento, di raffrescamento e di ventilazione, la quantità minima di rinnovo per persona e per m<sup>2</sup>, le tipologie di apparecchiature elettriche installate nei vari locali e i relativi apporti interni di calore.
- Pannello “Costruzione”: in questa schermata è possibile impostare le caratteristiche dei vari elementi edilizi, quali pareti esterne e divisorie, solai e coperture. Tramite questo pannello si definiscono le stratigrafie mediante la definizione dei materiali, degli spessori e le proprietà degli stessi: conducibilità [W/mK], densità [kg/m<sup>3</sup>] e calore specifico [J/kgK]. Design builder calcolerà in automatico la resistenza superficiale [m<sup>2</sup>K/W], la capacità termica [J/K], la trasmittanza termica [W/m<sup>2</sup>K] e la resistenza termica [m<sup>2</sup>K/W] di ciascun componente creato. Il software fornisce inoltre il diagramma delle pressioni di Glaser per verificare che non vi sia la presenza di condensa all’interno delle superfici opache.
- Pannello “Aperture”: questo modulo consente di impostare i materiali e le dimensioni di tutti gli elementi vetrati e dei telai e i relativi valori di trasmittanza termica.

- Pannello “Illuminazione”: tramite questa scheda si può definire la potenza della luce necessaria per ogni tipologia di ambiente [ $\text{W/m}^2$ -100 lux], il tipo di illuminazione e le ore di funzionamento.
- Pannello “HVAC” (Heating Ventilation Air Conditioning): grazie a questo pannello si può settare i sistemi di ventilazione, riscaldamento e raffrescamento. Occorre impostare le modalità di funzionamento degli impianti, così come la produzione di acqua calda sanitaria e la necessità di ventilazione naturale.

## 4.4 Definizione dell’utenza

Per quanto riguarda la definizione del comportamento dell’utenza, occorre definire sostanzialmente i parametri che riguardano:

- La ventilazione degli ambienti;
- Le infiltrazioni di aria esterna attraverso l’involucro;
- La presenza di persone;
- L’attività svolta dagli occupanti;
- Il funzionamento delle apparecchiature elettriche la tipologia dell’illuminazione;
- Le condizioni ambientali interne che si vogliono garantire.

In particolare, la definizione di tali parametri si può eseguire in via semplificata o in via dettagliata. Quest’ultima permette di definire i parametri a livello avanzato, utile per esempio quando si vuole eseguire valutazioni puntuali su alcuni aspetti specifici della zona termica. Ovviamente questa procedura richiede un maggior tempo e un grado di conoscenza elevato dei dati da inserire. Mediante la modalità semplificata, invece, il software richiede solamente l’inserimento dei dati fondamentali, in cui si inseriscono valori di default su quelli non richiesti, evitando di compromettere la precisione dei risultati. In questa modalità, tuttavia, non è possibile eseguire la distinzione tra le portate di aria per infiltrazione da quelle dovute alla ventilazione, valutare il confort termico degli occupanti e tenere conto dell’illuminazione naturale nel calcolo del consumo elettrico dell’illuminazione artificiale.

## 4.5 Output del programma

### 4.5.1 Calcolo del fabbisogno invernale ed estivo

Grazie al comando “Progetto di riscaldamento” Design Builder calcola il fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva ed invernale dell’edificio; i risultati di tale operazione sono un grafico delle temperature, un grafico di bilancio termico che riporta le perdite di carico attraverso l’involucro del fabbricato e infine il fabbisogno di energia per il riscaldamento per sopperire tali dispersioni e mantenere la temperatura di progetto di setpoint all’interno delle zone termiche. Nello specifico, le temperature riportate del grafico di output del software sono la temperatura dell’aria interna “ $T_a$ ”, temperatura media radiante “ $T_{mr}$ ”, la temperatura operativa “ $T_o$ ” e la temperatura esterna al bulbo secco.

Si precisa che la Temperatura Media Radiante è definita come la temperatura uniforme delle pareti di un ambiente fittizio, nero ( $\epsilon = 1$ ), in cui il soggetto scambierebbe per irraggiamento la stessa potenza termica, che scambia effettivamente nel locale reale; la Temperatura Operativa, invece, è definita come la temperatura uniforme delle pareti e dell’aria di un

ambiente fittizio, in cui il soggetto scambierebbe la stessa potenza termica secca (irraggiamento e convezione) che scambia effettivamente nel locale reale. Quest'ultima tiene conto quindi sia degli scambi convettivi che il soggetto ha con l'aria interna e sia degli effetti della temperatura media radiante. In altre parole, è la temperatura che percepisce il corpo dell'essere umano in un ambiente. In ambiente termicamente moderati e nei casi in cui sia  $T_{mr} - T_a < 4^\circ \text{C}$  e la velocità dell'aria relativa  $v_{ar} < 0,2 \text{ m/s}$  si può assumere in via approssimata:

$$T_{op} = \frac{T_{mr} + T_a}{2} \quad [185]$$

Per una maggior accuratezza si può utilizzare la formula:

$$T_{op} = (1 - A) \cdot T_{mr} + A \cdot T_a \quad [186]$$

Dove "A" è un valore che si ottiene in funzione della velocità relativa dell'aria:

**Tabella 4.3.1: Fattore A**

| var [m/s] | < 0,2 | 0,2 – 0,6 | > 0,6 |
|-----------|-------|-----------|-------|
| A         | 0,5   | 0,6       | 0,7   |

È importante rammentare e sottolineare che il valore di temperatura interna che influenza le sensazioni termiche non è quello della temperatura dell'aria interna, ma quella della cosiddetta temperatura operante, la quale è funzione sia temperatura dell'aria, sia della temperatura media radiante dell'ambiente.

Attraverso il comando "Progetto raffrescamento" Design Builder ricava i parametri che definiscono l'ambiente esterno, i quali vengono rappresentati mediante il grafico "Dati del luogo" e i dati relativi al confort termoigrometrico interno tramite il grafico "Confort". Nello specifico, nel grafico "Dati del luogo" sono riportati i seguenti dati riferiti al giorno più caldo dell'anno:

- Temperatura esterna [ $^\circ\text{C}$ ];
- Angolo azimutale del sole [ $^\circ$ ];
- Angolo zenitale del sole [ $^\circ$ ];
- Radiazione solare diretta [ $\text{kW/m}^2$ ];
- Radiazione solare diffusa [ $\text{kW/m}^2$ ].

Gli angoli azimutale e zenitale identificano la posizione del sole in funzione del sito in cui sorge il fabbricato, il primo corrisponde all'angolo formato dalla retta passante per la località e il sole e il piano orizzontale passante per la località e il secondo corrisponde all'angolo formato dalla retta passante per la località e il sole con la direzione del Sud.

La radiazione solare diretta, è l'energia solare che raggiunge la superficie terrestre senza essere perturbata dai gas presenti in atmosfera, mentre la radiazione solare diffusa, è l'energia solare radiante che viene turbata dai gas presenti in atmosfera e quindi cambia angolo di incidenza con il suolo. La radiazione totale è data dalla somma dei due valori.

Nel diagramma relativo al Confort termoigrometrico interno, invece, sono riportati i seguenti dati:

- Temperatura dell'aria interna [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- Temperatura radiante [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- Temperatura operante [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- Temperatura esterna a bulbo secco [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- Umidità relativa [%];
- Ricambi d'aria [vol/h].

Quest'ultimo parametro è ricavato dalle infiltrazioni di aria per ventilazione naturale, dall'impianto di ventilazione meccanica e dal sistema di ventilazione naturale.

#### 4.5.2 La simulazione dinamica

Come si è visto dai capitoli precedenti, Design Builder permette di calcolare il fabbisogno di riscaldamento e di raffrescamento rispettivamente nel giorno più freddo e in quello più caldo. Mentre il calcolo del calcolo invernale è in regime stazionario, quello estivo invece è in regime dinamico. La differenza sostanziale per il calcolo del carico termico sensibile di progetto per la climatizzazione estiva rispetto a quella invernale risiede nelle ipotesi semplificative per la soluzione di bilancio e nelle assunzioni che occorre tener presente per quanto riguarda le condizioni al contorno. Nel caso della climatizzazione estiva si osserva infatti che:

- I. La temperatura dell'aria esterna è fortemente variabile nel tempo, specie nell'arco diurno delle 24 ore. Ciò implica che durante la giornata può accadere che essa sia alternativamente più alta e più bassa rispetto alla temperatura all'interno della zona termica climatizzata;
- II. Come conseguenza del punto riportato sopra, la differenza media di temperatura fra ambiente interno ed esterno non può essere considerata costante;
- III. La radiazione solare incidente sulla superficie esterna dei componenti opachi ed entrante attraverso quelli trasparenti e i carichi endogeni prodotti dalle sorgenti interne, rappresentano addendi positivi del bilancio termico e quindi vanno ad aggravare sul carico termico;
- IV. La radiazione solare e i carichi endogeni presentano fluttuazioni notevoli temporali, e soprattutto gli ultimi, mutano in maniera stocastica;
- V. Gli effetti di accumulo termico e l'inerzia dell'edificio non possono essere trascurati.

Il software utilizzato per questo caso di studio permette di svolgere le analisi in regime dinamico attraverso il comando "Simulazione". Grazie a questo comando è possibile osservare come si sviluppano, all'interno di intervalli temporali più o meno ampi, le variabili termiche che influiscono sul comportamento energetico dell'edificio. È possibile eseguire la simulazione impostando un periodo pari ad un anno, oppure fare la simulazione per il periodo invernale e quella per il periodo estivo in modo separato. Oltre ad impostare l'arco temporale è necessario

impostare l'intervallo di simulazione (mensile, annuale, giornaliero, orario e sub- orario), il numero di step di calcolo all'ora (per una maggiore accuratezza della simulazione occorre impostare un numero elevato di step) e le opzioni relative agli ombreggiamenti dovuti agli edifici limitrofi e alle riflessioni.

Tramite questo comando si ottengono una serie di grafici che riportano i dati del luogo, i dati di confort termico, gli apporti delle sorgenti interne, il bilancio termico e i dati relativi alla ventilazione naturale e meccanica.

Nello specifico, nel grafico "Dati del luogo" sono riportati:

- temperatura bulbo secco [°C];
- radiazione solare diretta [kW/m<sup>2</sup>];
- radiazione solare diffusa[kW/m<sup>2</sup>].

Nel diagramma "Apporti interni", invece, sono riportate le quantità dei flussi termici che entrano in ambiente o che sono generati al suo interno:

- carichi termici endogeni (illuminazione, computer e altre apparecchiature);
- carichi termici dovuti alla presenza di persone;
- la radiazione solare entrante attraverso le superfici dell'involucro trasparente;
- il flusso termico scambiato attraverso le superfici dell'involucro opaco;
- i flussi entalpici connessi con le portate di aria di ventilazione e infiltrazione;

#### 4.5.3 Analisi fluidodinamica computazionale (CFD)

Il termine "CFD" (Computational Fluid Dynamics) indica un insieme di metodi analitici per determinare la temperatura, la velocità e altre proprietà dell'aria all'interno di uno spazio tridimensionale. Il software, attraverso questa operazione, permette di studiare gli effetti degli impianti HVAC "Heating, Ventilation and Air Conditioning" sull'ambiente interno, il confort termoigrometrico e i flussi d'aria che si creano.

Nello specifico, tramite questo comando, è possibile vedere come si muove il fluido aria all'interno delle zone termiche e come si distribuisce la sua temperatura in maniera puntuale. Risulta molto utile quindi per lo studio del confort termoigrometrico per i vari locali che compongono l'edificio, oltre che per lo studio dell'efficacia dei sistemi di ventilazione e di climatizzazione adottati. La simulazione viene eseguita su una griglia con dimensioni impostate dall'utente, sulla quale vengono determinati i valori di temperatura, velocità, pressione e confort interno. Al termine di questa analisi vengono visualizzate delle sezioni che riportano i risultati tramite una scala di colori. Infine, tramite il comando "Condizioni al contorno CFD" è possibile andare a modificare le condizioni al contorno, quali temperature superficiali dei componenti, temperatura dell'aria e i flussi in ingresso e in uscita dai vari locali.

## Capitolo 5- Applicazione del calcolo dinamico al caso di studio

### 5.1 Modellazione edificio con Design Builder

Sulla base delle piante dell'edificio esportate da Autocad, è stato possibile effettuare la modellazione della geometria del palazzo oggetto di studio. L'edificio, sviluppato su cinque piani fuori terra e un piano seminterrato, è costituito da ventiquattro appartamenti e da un vano scala, il quale è stato definito nel software come "semi esterno non condizionato", poiché non è impostato nessun tipo di impianto in quanto rappresenta una zona non riscaldata. Inoltre, per simulare il passaggio dell'aria tra i vari piani all'interno del corpo scale, sono stati eseguiti dei buchi sui pavimenti e sui soffitti, mediante il comando "foro". Per ogni piano quindi sono state create una zona per ogni alloggio e una zona per il blocco scala ascensore.

I balconi dei relativi appartamenti, invece, sono stati impostati come "blocco componente standard", ossia non contengono nessun tipo di attività e non sono né riscaldati e né raffrescati dall'impianto presente, ma sono importanti per la simulazione dinamica in quanto producono ombreggiamenti sui componenti vetrati e sulle superfici opache dell'edificio.

Infine, per tener conto del contesto in cui si colloca l'edificio, sono stati modellati anche le geometrie degli edifici adiacenti, in modo tale da considerare nel calcolo dinamico anche le zone d'ombra generate da quest'ultimi.

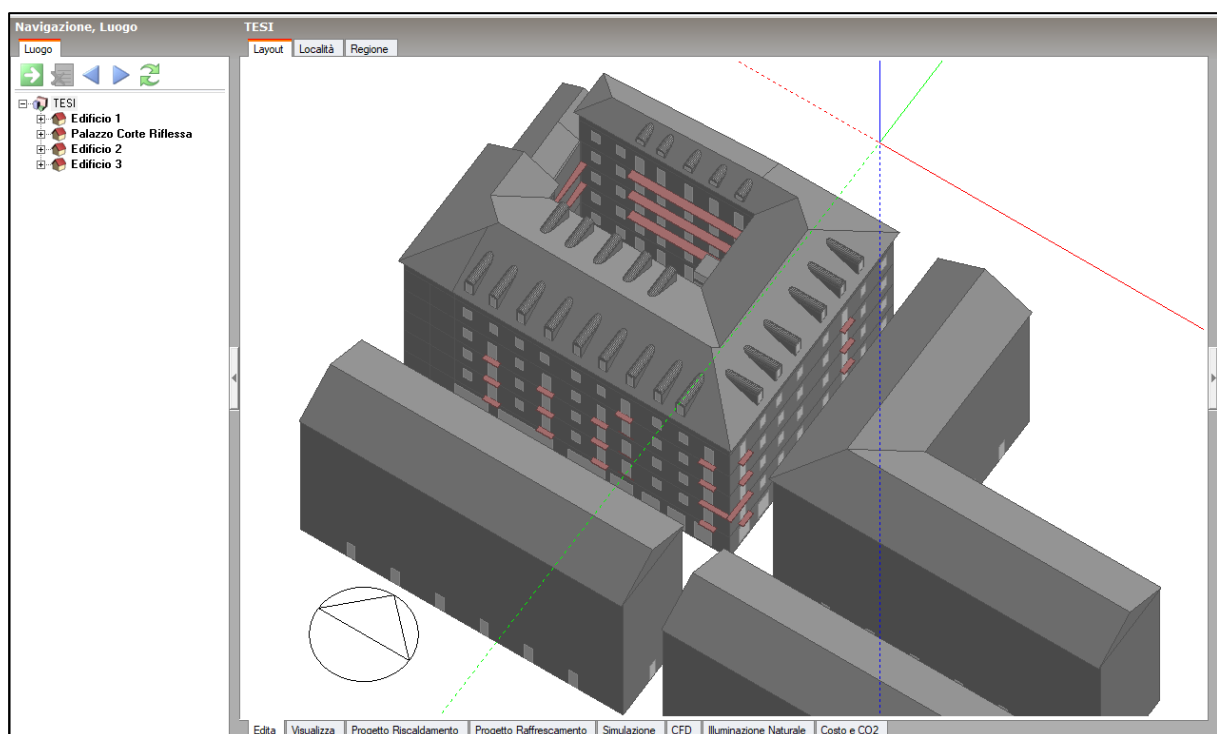


Figura 5.1.1. Design Builder, scheda "Layout" Palazzo Corte Riflessa

### 5.1.1 Dati climatici

I dati climatici relativi alla città di Torino, vengono inseriti attraverso il pannello “Località”, selezionati dai dati meteorologici dell’anno tipo contenuti nel database di EnergyPlus per il comune di Torino.

| Sant'Agostino                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Layout                                                                                                                                                        | Località                                                                                                                                                                                              |
| Template della Località                                                                                                                                       | Template                                                                                                                                                                                              |
| Coordinate Geografiche                                                                                                                                        | Latitudine (°) 45,70<br>Longitudine (°) 7,43<br>Zona climatica ASHRAE 4A                                                                                                                              |
| Dettagli geomorfologici del luogo                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                       |
| Zona Oraria e parametri ora legale                                                                                                                            | (GMT+01:00) Amsterdam, Berlin, Bern, Rome, Stockholm, Vienna                                                                                                                                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> Utilizza ora legale<br>Inizio dell'inverno Oct<br>Fine dell'inverno Apr<br>Inizio dell'estate Apr<br>Fine dell'estate Ott |                                                                                                                                                                                                       |
| Dati Climatici Simulazione                                                                                                                                    | File climatico orario ITA_TORINO-CASELLE_IGDG<br>Giorno della settimana per il giorno di inizio 8-Usa file climatico<br><input checked="" type="checkbox"/> Use weather file snow and rain indicators |
| Dati climatici Progetto Riscaldamento                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                       |
| Dati climatici Progetto Raffrescamento                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                       |

Figura 5.1.1.1 Design Builder, scheda "Località", dati climatici

### 5.1.2 Attività

In seguito sono stati impostati i parametri presenti nella scheda “Attività”:

- tasso di occupazione: in riferimento alla norma UNI 10339, dato che l’edificio in questione è adibito a residenza, è stato considerato un indice di affollamento pari a 0,04 persone/m<sup>2</sup>;
- consumo acqua calda sanitaria: dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-2, il volume d’acqua calda richiesto durante il periodo di calcolo si ricava mediante la seguente formula:

$$V_w = a \cdot S_u + b \quad [\text{litri/giorno}]$$

dove

“a” è un parametro in litri / (m<sup>2</sup> giorno) ricavabile dal prospetto 30;

“b” è un parametro in litri / giorno ricavabile dal prospetto 30;

“S<sub>u</sub>” è la superficie utile dell’abitazione espressa in metri quadri.

Tabella 5.1.2.1 UNI/TS 11 300-2, Prospetto 30

| Superficie utile<br>$S_u$ [m <sup>2</sup> ] | $S_u \leq 35$ | $35 < S_u \leq 50$ | $50 < S_u \leq 200$ | $S_u > 200$ |
|---------------------------------------------|---------------|--------------------|---------------------|-------------|
| $a$<br>[litri / (m <sup>2</sup><br>giorno)] | 0             | 2,667              | 1,067               | 0           |
| $b$<br>[litri / giorno]                     | 50            | - 43,33            | 36,67               | 250         |

È stato effettuato successivamente il calcolo di “V<sub>w</sub>” per ogni vano:

Tabella 5.1.2.2 Calcolo consumo acqua calda sanitaria

| VANO          | $S_u$<br>[m <sup>2</sup> ] | $a$<br>[litri / giorno] | $b$<br>[litri / giorno] | V <sub>w</sub><br>[litri/giorno] |
|---------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 1             | 66                         | 1,067                   | 35,67                   | 106,09                           |
| 2             | 48                         | 2,667                   | -43,33                  | 84,69                            |
| 3             | 46                         | 2,667                   | -43,33                  | 79,35                            |
| 4             | 103                        | 1,067                   | 35,67                   | 145,57                           |
| 5             | 45                         | 2,667                   | -43,33                  | 76,69                            |
| 6             | 37                         | 2,667                   | -43,33                  | 55,35                            |
| 7             | 67                         | 1,067                   | 35,67                   | 107,16                           |
| 8             | 48                         | 2,667                   | -43,33                  | 84,69                            |
| 9             | 35                         | 0                       | 50                      | 50,00                            |
| 10            | 103                        | 1,067                   | 35,67                   | 145,57                           |
| 11            | 37                         | 2,667                   | -43,33                  | 55,35                            |
| 12            | 45                         | 2,667                   | -43,33                  | 76,69                            |
| 13            | 67                         | 1,067                   | 35,67                   | 107,16                           |
| 14            | 49                         | 2,667                   | -43,33                  | 87,35                            |
| 15            | 36                         | 2,667                   | -43,33                  | 52,68                            |
| 16            | 90                         | 1,067                   | 35,67                   | 131,70                           |
| 17            | 103                        | 1,067                   | 35,67                   | 145,57                           |
| 18            | 96                         | 1,067                   | 35,67                   | 138,10                           |
| 19            | 118                        | 1,067                   | 35,67                   | 161,58                           |
| 20            | 40                         | 2,667                   | -43,33                  | 63,35                            |
| 21            | 71                         | 1,067                   | 35,67                   | 111,43                           |
| 22            | 63                         | 1,067                   | 35,67                   | 102,89                           |
| 23            | 53                         | 1,067                   | 35,67                   | 92,22                            |
| 24            | 76                         | 1,067                   | 35,67                   | 116,76                           |
| <b>TOTALE</b> | <b>1542</b>                |                         |                         | <b>2377,98</b>                   |



Come si può notare dalla tabella 5.1.2.2, il volume d'acqua calda giornaliero richiesto per i ventiquattro alloggi è pari a 2377,98 l/giorno, al quale corrisponde un valore di consumo di acqua calda sanitaria da inserire nel software pari a 1,54 l/m<sup>2</sup> giorno.

- Resistenza termica del vestiario: la norma UNI EN ISO 7730 fornisce i valori della resistenza termica del vestiario " $I_{cl}$ " di alcuni abbigliamento tipici: nel caso in esame sono stati inseriti i valori standard di 1,0 clo per la stagione invernale e 0,5 per quella estiva.
- Temperatura di set point: per la climatizzazione invernale la norma UNI/TS 11300-1 riporta che per tutte le categorie di edifici ad esclusione delle categorie E.6(1), E.6(2) e E.8, si assume una temperatura interna costante pari a 20°C. Per quanto riguarda la climatizzazione estiva, invece, si assume una temperatura interna costante pari a 26°C.
- Aria minima di rinnovo: la Norma Italiana 10339 riporta le portate di aria esterna in edifici adibiti ad uso civile. In particolare, per ogni destinazione d'uso, vengono fornite le portate d'aria esterna o di estrazione. Per quanto riguarda le residenze a carattere continuativo, il valore riportato nel prospetto III per i soggiorni e le camere da letto è pari a  $11 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$  per persona, mentre per le cucine, bagni e servizi è richiesto un ricambio pari a 0,0011 vol/s (4vol/h).

TESI, Palazzo Corte Riflessa

Layout Attività Costruzione Aperture Illuminazione HVAC Generazione Aspetti economici Output CFD

Templates attività

**Template** Residenziale

Settore Residential spaces

Moltiplicatore zona 1

☐ Includi zona nei calcoli termici

☒ Includi zona nei calcoli di illuminazione naturale di Radiance

Superficie a Pavimento Totale Edificio

Occupazione

Densità (persone/mq) 0,0400

Programma Programma\_alloggi

Tasso metabolico

Setpoint di concentrazione di contaminante generico (ppm)

Vacanze

Controllo Ambientale

Setpoint di Riscaldamento

Riscaldamento (°C) 20,0

Temp. di attenuazione in Riscaldamento (°C) 14,0

Setpoint di Raffrescamento

Raffrescamento (°C) 25,0

Temp. Di attenuazione in Raffrescamento (°C) 30,0

Controllo Umidità

Setpoint di Ventilazione

Aria minima di rinnovo

Illuminazione

Computers

Dispositivi d'Ufficio

Varie

Preparazione cibi

Macchinari aggiuntivi

Figura 5.1.2.1 Design Builder, "Pannello attività"

### 5.1.3 Costruzione

Successivamente, tramite il pannello “Costruzione”, sono state impostate le stratigrafie dei vari componenti edilizi dell’edificio, copiando i materiali già presenti nella libreria del software e andando a modificare le relative proprietà fisiche in base ai valori forniti dalle schede tecniche.

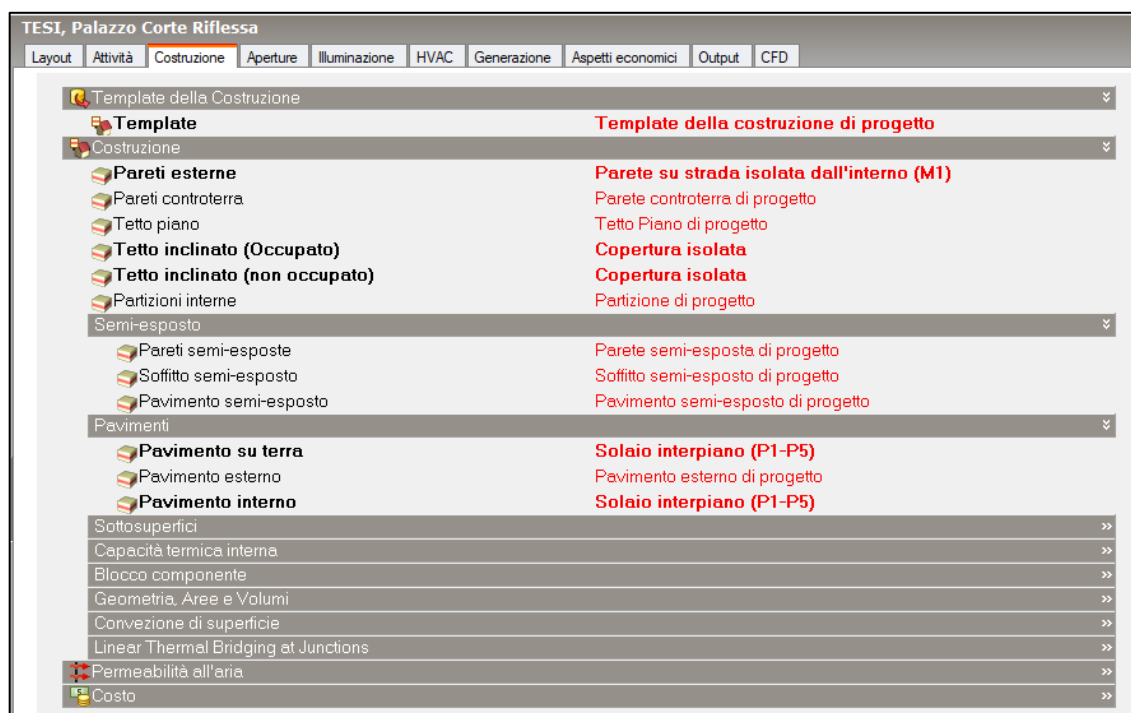


Figura 5.1.3.1 Design Builder, “Pannello costruzione”

Il software fornisce inoltre il diagramma delle pressioni di Glaser per verificare la presenza di condensa all’interno delle superfici opache. È stato verificato che nelle stratigrafie nelle pareti e nei i solai impiegati per il progetto, non vi sia la presenza di condensa interstiziale.

Infine, sempre dal pannello “Costruzione”, è stato impostato un valore costate pari a 0,3 vol/h relativo alla permeabilità all’aria, come riportato della specifica tecnica UNI TS 11300. Tale parametro tiene conto dello scambio non intenzionale e incontrollato di aria fra ambiente interno ed esterno, ovvero alle infiltrazioni attraverso aperture avventizie, imperfette tenute, fessure, aperture di porte e finestre.

### 5.1.4 Aperture

Passando alla scheda “Aperture”, sono state impostate le dimensioni dei corpi vetrati e dei relativi telai; inoltre, sono stati definiti i valori di trasmissione solare, trasmissione visibile e trasmittanza termica di tali elementi. Nel caso in esame è stata spuntata la voce “sistemi di schermatura esterni” per tenere in considerazione delle lamelle frangisole esterne regolabili e le tende mobili filtranti esterne istallate.

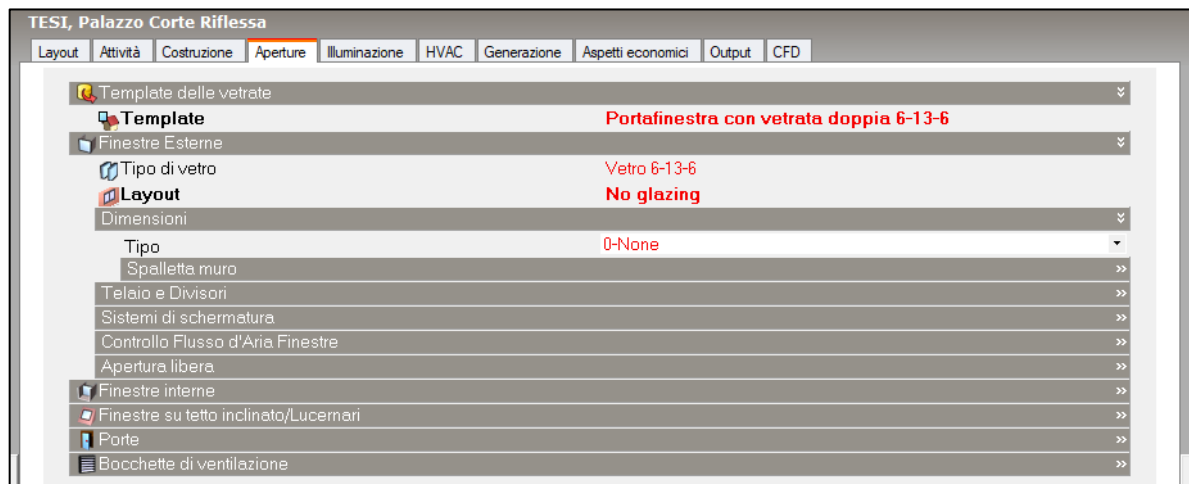


Figura 5.1.4.1 Design Builder, “Pannello aperture”

Nello specifico, è stato creato un nuovo template per i serramenti esterni che rispettasse le seguenti prestazioni minime richieste da progetto:

- Vetro
  - Trasmittanza termica  $U_g \leq 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
  - Fattore solare del vetro  $G \geq 0,6$
  - Trasmissione luminosa del vetro  $TL \geq 0,75$
  - Distanziale caldo (warm-edge  $\psi \leq 0,05 \text{ W/mK}$
- Telaio
  - Trasmittanza termica  $U_f \leq 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Prestazioni complessive del serramento
  - Tenuta all'aria: classe 4 (massima)
  - Tenuta all'acqua: classe 7A o superiore
  - Resistenza al vento: classe B4 o superiore
  - Indice di isolamento acustico certificato per il sistema serramento  $R_w = 42\text{dB}$

Nello specifico, gli infissi sono stati modellati con un vetro doppio basso emissivo composto da tre strati: una lastra esterna trattata da 6 mm, un'intercapedine di 13 mm di Aragon e una lastra interna da 6mm. Il telaio invece in legno. Infine, sono stati posizionati a 30 centimetri dal filo esterno come indicato dalle piante di progetto.

### 5.1.5 Illuminazione

Tramite la scheda “illuminazione” è stato impostato la densità di potenza dell’illuminazione (LPD) espresso in  $\text{W/m}^2$ . Tale valore è stato posto pari a  $3,4 \text{ W/m}^2$  in quanto sono state scelte delle illuminazioni di tipo a LED. Sempre dalla stessa scheda è stata impostata la tipologia di illuminazione “1-Sospeso” ed è stata posta un’altezza del piano pari a 2,8 m.

Figura 5.1.5.1 Design Builder, “Pannello illuminazione”

### 5.1.6 HVAC

Infine, sono state impostate i dati relativi agli impianti di riscaldamento e condizionamento tramite la scheda “HVAC”, come indicato nella figura 5.1.6.1. Nel caso specifico, è stata utilizzata la procedura dettagliata di calcolo. Questo livello di simulazione prevede un calcolo parametrico degli impianti, i quali sono modellati tramite il motore di calcolo EnergyPlus. Sono stati impostati i valori in funzione alle caratteristiche tecniche dei macchinari previsti. In alternativa il software permette di impostare una procedura semplificata di calcolo. In questo modo, però, i sistemi HVAC sono modellati utilizzando carichi ideali e il consumo di combustibile è calcolato in funzione ai carichi basati sull’efficienza stagionale.

Il calcolo tiene conto dell’energia ausiliaria per il funzionamento dell’elettropompe che garantiscono la circolazione del fluido termovettore e l’energia ausiliaria dei ventilatori dei fancoil presenti nelle varie unità abitative.

In questo pannello sono stati inoltre settati i programmi di funzionamento della ventilazione meccanica, dell’impianto di riscaldamento e di raffrescamento. Per quanto riguarda il periodo di funzionamento della ventilazione meccanica è stato impostato tutto l’anno in base all’aria minima di rinnovo per persona, mentre per l’impianto di riscaldamento e raffrescamento sono stati impostati due programmi: uno invernale, dal 15 ottobre al 15 aprile (compresi) per una durata di accensione pari a 14 ore giornaliera, e uno estivo dal 16 aprile al 14 ottobre sempre considerando l’impianto acceso per 14 ore al giorno.

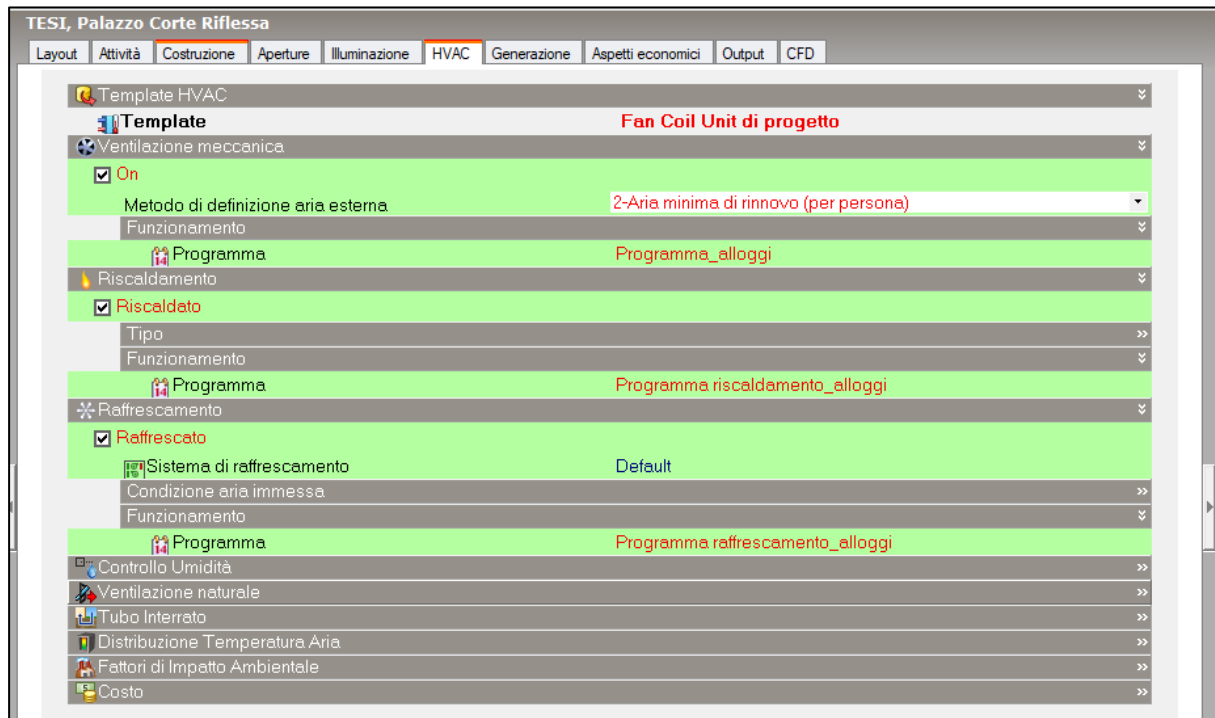


Figura 5.1.6.1 Design Builder, "HVAC"

Per rendere la simulazione quanto più possibile reale, è stato impostato il funzionamento degli impianti in funzione dell'occupazione da parte dei condomini durante le ore del giorno.

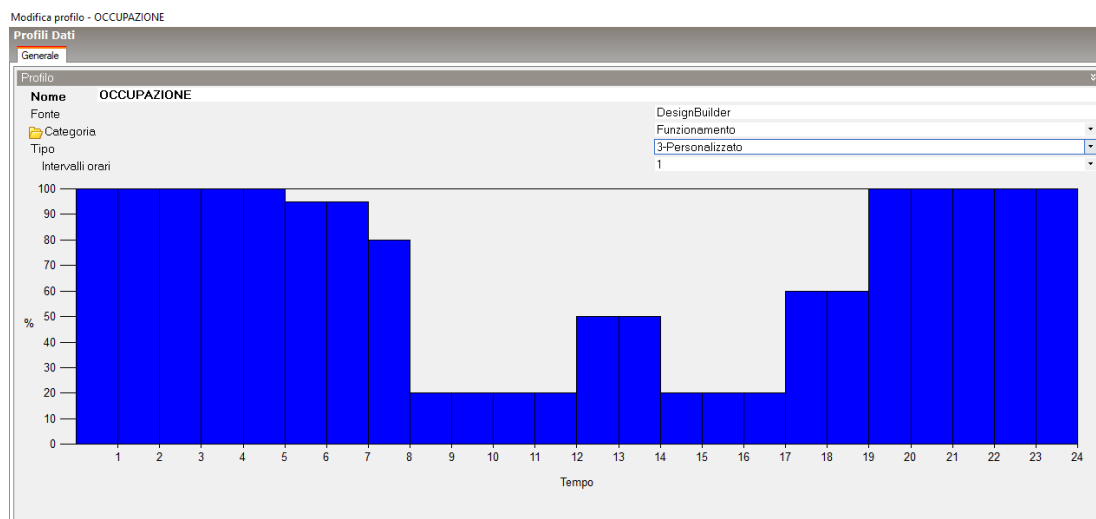


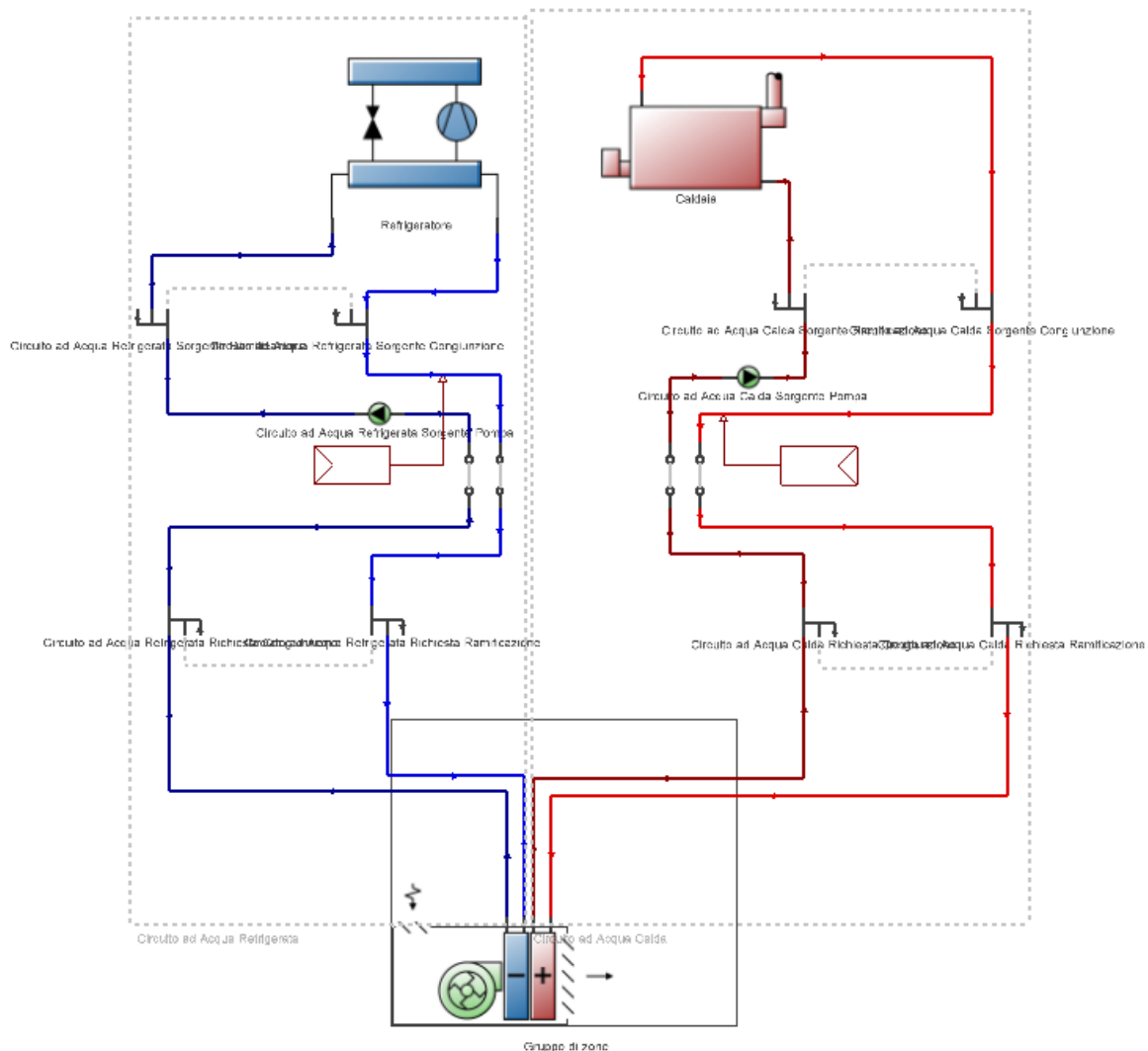
Figura 5.1.6.2 Design Builder, Funzionamento impianti

Come riportato nella figura 5.1.6.2, sono state impostate le percentuali di funzionamento degli impianti in funzione alla presenza delle persone nell'intero edificio, ipotizzata ogni ora. Come si può notare, è stato previsto che dalle 8.00 di mattina il funzionamento si riduca del 20% in quanto maggior parte dei condomini esce per andare al lavoro, aumenta fino al 50% dalle 12.00 alle 14.00 per tener conto delle persone che rientrano in pausa pranzo, dalle 14.00

la percentuale ritorna al 20% per poi crescere dalle 17.00 e ritornare al 100% alle 19.00, supponendo che tutti siano rientrati dal proprio lavoro.

Entrando nel merito del sistema HVAC, in DesignBuilder lo schema funzionale di centrale si riduce ad un circuito semplificato costituito dai seguenti sottosistemi:

- circuito ad acqua calda;
- circuito ad acqua refrigerata;
- gruppo di zone.



**Figura 5.1.6.3 Design Builder, schema impianto HVAC**

L'impianto viene associato all'intero edificio mediante il gruppo zone e la configurazione si esegue andando ad impostare i dati per ogni componente. Per quanto riguarda il circuito ad acqua calda occorre impostare i dati relativi ai seguenti componenti:

- caldaia;
- setpoint manager;
- pompa del circuito acqua calda sorgente.

Per quanto concerne il circuito ad acqua refrigerata, invece, occorre impostare i valori relativi ai seguenti componenti:

- refrigeratore;
- setpoint menager;
- pompa del circuito acqua refrigerata sorgente.

Una volta impostati i valori per ogni elemento, si passa al gruppo zone per impostare, per ogni fancoil, le caratteristiche dei relativi componenti, quali:

- ventilatore di immissione;
- batteria di raffreddamento;
- batteria di riscaldamento.

### Configurazione circuito ad acqua calda

- 1. caldaia:** per il settaggio della caldaia sono state considerate le due caldaie a condensazione come un unico oggetto, per cui i valori ricavati dalla scheda tecnica relativi alla capacità nominale, al carico elettrico ausiliario e alla portata d'acqua di progetto, sono stati raddoppiati.

| Caldaia Dati                                                   |                                  |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Caldaia Acqua Calda                                            |                                  |
| Generale                                                       |                                  |
| Nome                                                           | Caldaia                          |
| Template caldaia                                               | Sistema modulare a condensazione |
| Tipo di Combustibile                                           | 1-Gas naturale                   |
| Capacità nominale (W)                                          | 181800,000                       |
| Modalità flusso caldaia                                        | 3-Non modulante                  |
| Carico elettrico ausiliario (W)                                | 25,000                           |
| Fattore di Dimensionamento                                     | 1,00                             |
| Efficienza                                                     |                                  |
| Efficienza Termica Nominale                                    | 1,000                            |
| Variabile di valutazione della curva di efficienza in base ... | LeavingBoiler                    |
| Curva normalizzata di efficienza della caldaia                 | CondensingBoilerEff              |
| Uscita Acqua                                                   |                                  |
| Portata d'acqua di progetto (mc/s)                             | 0,00580                          |
| Rapporto di Carico Parziale                                    |                                  |
| Rapporto di carico parziale minimo                             | 0,000                            |
| Rapporto di carico parziale massimo                            | 1,000                            |
| Rapporto di carico parziale ottimale                           | 1,000                            |

Figura 5.1.6.4 Design Builder, settaggio caldaia

- 2. Pompe di circolazione:** per la pompa a servizio del circuito di mandata e del circuito di ritorno, sono stati impostati i valori dell'elettropompa ad alta efficienza elettronica a velocità variabile, marca Grundfos, modello Magna3 25/100.

| Pompa Dati                                                   |                                              |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Generale                                                     |                                              |
| Generale                                                     |                                              |
| Nome                                                         | Circuito ad Acqua Calda Sorgente Pompa       |
| Tipo                                                         | 2-Velocità variabile                         |
| Impostazioni della Pompa                                     |                                              |
| Consumo nominale di energia (W)                              | 326                                          |
| Prevalenza nominale della pompa (Pa)                         | 117600,00                                    |
| Efficienza del motore                                        | 0,90                                         |
| Frazione delle inefficienze del motore recuperate nel fluido | 0,00                                         |
| Portata minima (mc/s)                                        | 0,00578                                      |
| Tipo di controllo della pompa                                | 2-Intermittente                              |
| Prestazione a Carico Parziale                                |                                              |
| Template della curva di prestazione                          | Pump Part-Load Power, Default Variable Speed |
| Coefficienti della Pompa                                     |                                              |
| Coefficiente 1 della pompa                                   | 0,2000000                                    |
| Coefficiente 2 della pompa                                   | 0,8000000                                    |
| Coefficiente 3 della pompa                                   | 0,0000000                                    |
| Coefficiente 4 della pompa                                   | 0,0000000                                    |

Figura 5.1.6.5 Design Builder, settaggio pompa

3. **Setpoint Manager:** questo elemento nel circuito idronico controlla la temperatura dell'acqua di mandata sulla base di un programma od utilizzando la compensazione climatica in cui la temperatura di mandata di controllo è proporzionale alla temperatura dell'aria esterna. Nel caso specifico è stato scelto un'impostazione di controllo h24 di 80°C.

### Configurazione circuito ad acqua refrigerata

1. **refrigeratore:** come nel caso della caldaia, anche il settaggio del refrigeratore è stato eseguito considerando i due refrigeratori Aernova A 73 CR come un unico oggetto.

| Refrigeratore Dati                                                                                                 |                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Refrigeratore                                                                                                      |                                              |
| <b>Generale</b>                                                                                                    |                                              |
| Nome                                                                                                               | Refrigeratore                                |
| Template refrigeratore                                                                                             | Refrigeratore aria/acqua AERNOVA 73 CR       |
| Tipo di refrigeratore                                                                                              | 2-EIR Elettrico                              |
| Capacità di riferimento (W)                                                                                        | 38600,000                                    |
| COP di riferimento                                                                                                 | 3,200                                        |
| Efficienza del motore del compressore                                                                              | 1,000                                        |
| Modalità di flusso del refrigeratore                                                                               | 2-Modulo in funzione del setpoint di mandata |
| Fattore di dimensionamento                                                                                         | 1,10                                         |
| <b>Condensatore</b>                                                                                                |                                              |
| Tipo di Condensatore                                                                                               | 1-Raffreddato ad aria                        |
| Rapporto di potenza del ventilatore del condensatore                                                               | 0,035                                        |
| <b>Temperature</b>                                                                                                 |                                              |
| Temperatura di riferimento dell'acqua refrigerata in uscita (°C)                                                   | 7,000                                        |
| Temperatura di riferimento del fluido in ingresso al condensatore (°C)                                             | 40,000                                       |
| Limite di temperatura in uscita dell'acqua fredda (°C)                                                             | 5,000                                        |
| <b>Portate</b>                                                                                                     |                                              |
| Portate acqua refrigerata di riferimento (mc/s)                                                                    | Autosize                                     |
| <b>Curve di Prestazione</b>                                                                                        |                                              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Curva della capacità di raffreddamento in funzione della temperatura           | Air cooled CentCapFT                         |
| <input checked="" type="checkbox"/> Curva del rapporto tra energia consumata e raffreddamento fornito in funzio... | Air cooled CentEIRFT                         |
| <input checked="" type="checkbox"/> Curva del rapporto tra energia consumata e raffreddamento fornito in funzio... | Air cooled CentEIRFPLR                       |
| <b>Impostazioni del carico parziale</b>                                                                            |                                              |
| Rapporto di carico parziale minimo                                                                                 | 0,100                                        |
| Rapporto di carico parziale massimo                                                                                | 1,000                                        |
| Rapporto di carico parziale ottimale                                                                               | 1,000                                        |
| Rapporto di scarico minimo                                                                                         | 0,100                                        |

Figura 5.1.6.6 Design Builder, settaggio refrigeratore

2. **Pompe di circolazione:** per la pompa a servizio del circuito di mandata e del circuito di ritorno, sono stati impostati i valori dell'elettropompa ad alta efficienza elettronica a velocità variabile, marca Grundfos, modello Magna3 25/100.

| Pompa Dati                                                   |                                                |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Generale                                                     |                                                |
| <b>Generale</b>                                              |                                                |
| Nome                                                         | Circuito ad Acqua Refrigerata Lato sorgente Po |
| Tipo                                                         | 2-Velocità variabile                           |
| <b>Impostazioni della Pompa</b>                              |                                                |
| Consumo nominale di energia (W)                              | 326                                            |
| Prevalenza nominale della pompa (Pa)                         | 117600                                         |
| Efficienza del motore                                        | 0,90                                           |
| Frazione delle inefficienze del motore recuperate nel fluido | 0,00                                           |
| Portata minima (mc/s)                                        | 0,00578                                        |
| Tipo di controllo della pompa                                | 2-Intermittente                                |
| <b>Prestazione a Carico Parziale</b>                         |                                                |
| Template della curva di prestazione                          | Pump Part-Load Power, Default Variable Speed   |
| <b>Coefficienti della Pompa</b>                              |                                                |
| Coefficiente 1 della pompa                                   | 0,0000000                                      |
| Coefficiente 2 della pompa                                   | 1,0000000                                      |
| Coefficiente 3 della pompa                                   | 0,0000000                                      |
| Coefficiente 4 della pompa                                   | 0,0000000                                      |

Figura 5.1.6.6 Design Builder, settaggio refrigeratore



3. **Setpoint Manager:** il controllo della temperatura dell'acqua di mandata refrigerata viene eseguita mediante un programma h24 con temperatura pari a 6°C.

### Configurazione gruppo di zone

Una volta settate le componenti impiantistiche si passa al gruppo di zone. Mediante questo livello è possibile modificare le proprietà HVAC di ogni zona. Nel caso in oggetto sono stati inseriti i fancoil per i locali soggiorno, cucina e camera da letto. Il software permette di modificare l'elemento della singola zona e di applicare le stesse caratteristiche per le altre zone. Selezionando il singolo fancoil si possono impostare i parametri relativi al ventilatore, alla batteria di riscaldamento e alla batteria di raffreddamento. Nel caso specifico, sono stati impostati i seguenti valori tramite la scheda tecnica del ventilconvettore "Carisma":

1. Ventilatore  
Efficienza totale: 0,70  
Prevalenza: 100 Pa  
Efficienza del motore: 0,90
2. Batteria di raffreddamento

| Batteria di Raffreddamento ad Acqua Dati       |                                          |
|------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Batteria di raffreddamento   Obiettivo         |                                          |
| <b>Generale</b>                                |                                          |
| Nome                                           | Piano2:A04.05 Unità Fan Coil Batteria di |
| Tipo                                           | 1-Acqua                                  |
| Portata d'acqua di progetto (mc/s)             | Autosize                                 |
| Flusso d'aria di progetto (mc/s)               | 0,075                                    |
| Temperatura di progetto acqua in ingresso (°C) | 7,000                                    |
| Temperatura di progetto aria in ingresso (°C)  | 27,000                                   |
| Temperatura di progetto aria in uscita (°C)    | 19,000                                   |
| Umidità di progetto dell'aria in ingresso      | Autosize                                 |
| Umidità di progetto dell'aria in uscita        | Autosize                                 |
| Tipo di analisi                                | 1-Analisi semplificata                   |
| Configurazione dello scambiatore di calore     | 1-Flussi incrociati                      |
| <b>Funzionamento</b>                           |                                          |
| Programma di disponibilità                     | On 24/7                                  |

Figura 5.1.6.7 Design Builder, batteria di raffreddamento

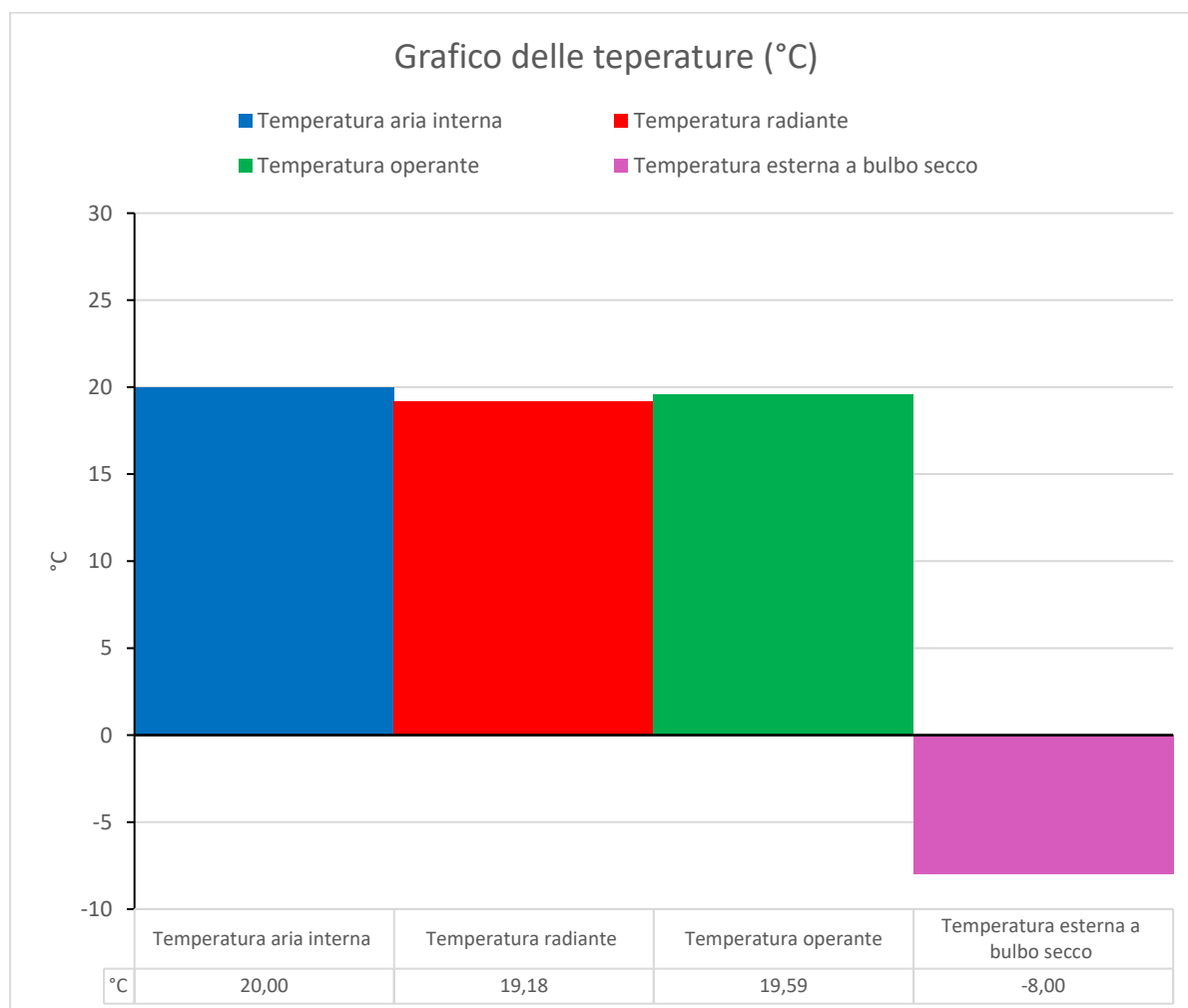
3. Batteria di riscaldamento

| Batteria di Riscaldamento Dati          |                                          |
|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| Batteria di Riscaldamento   Obiettivo   |                                          |
| <b>Generale</b>                         |                                          |
| Nome                                    | Piano2:A04.05 Unità Fan Coil Batteria di |
| Tipo                                    | 1-Acqua                                  |
| Metodo di definizione delle prestazioni | 2-UA e portata d'acqua di progetto       |
| Massima portata acqua (mc/s)            | Autosize                                 |
| UA (W/K)                                | Autosize                                 |
| <b>Funzionamento</b>                    |                                          |
| Programma di disponibilità              | On 24/7                                  |

Figura 5.1.6.8 Design Builder, batteria di riscaldamento

## 5.2 Calcolo del carico invernale

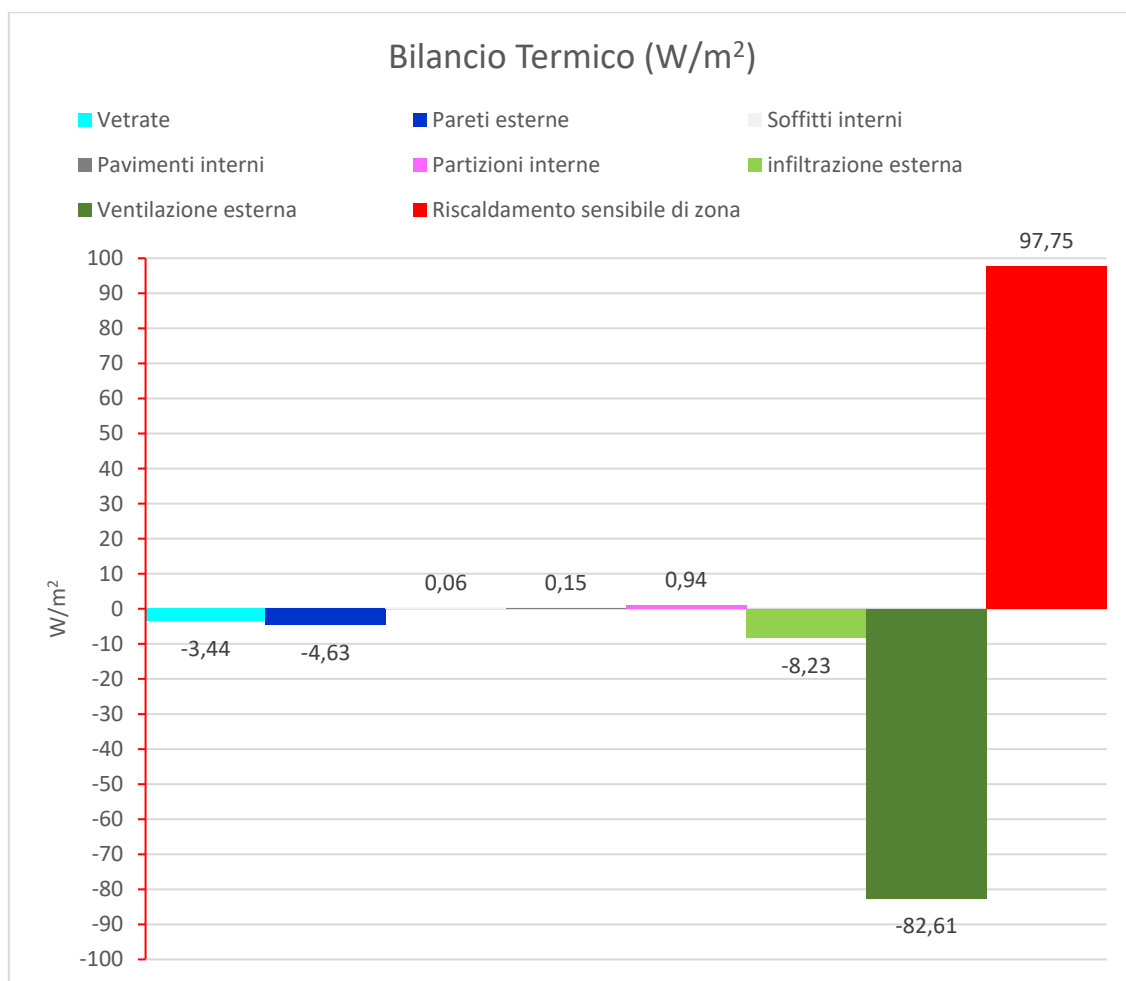
Tramite il comando “Progetto di riscaldamento”, Design Builder permette di calcolare il fabbisogno di riscaldamento nel giorno più freddo. Il calcolo del carico termico invernale è in regime stazionario e come output di tale analisi si ottiene un grafico delle temperature e un grafico di bilancio termico, nel quale si possono osservare le perdite attraverso l’involucro, oltre al fabbisogno di riscaldamento per sopperire tali dispersioni e per mantenere la temperatura di set point interna.



**Grafico 5.2.1 Design Builder, Progetto di riscaldamento – grafico temperature**

Come si evince dal grafico e dalla relativa tabella, la temperatura media dell’aria all’interno dell’edificio risulta essere pari il 20,0 °C, come impostato da set point. Tale temperatura è garantita dagli strati di isolante posti negli elementi costruttivi che separano ambienti riscaldati da quelli non riscaldati, quali corpo scala, corridoi e locali limitrofi. Il valore della temperatura operante, cioè quella che influenza le sensazioni termiche, è invece pari a 19,59°C.

Il secondo grafico riportato di output del programma è il grafico “bilancio termico”, in cui vengono riportate le perdite attraverso l’involucro dovute alla ventilazione e il fabbisogno di riscaldamento per bilanciare tali dispersioni e mantenere la temperatura di set point interna.



**Grafico 5.2.2 Design Builder, Progetto di riscaldamento\_ grafico bilancio termico**

**Tabella 5.2.2 – Valori delle perdite di calore\_Progetto invernale**

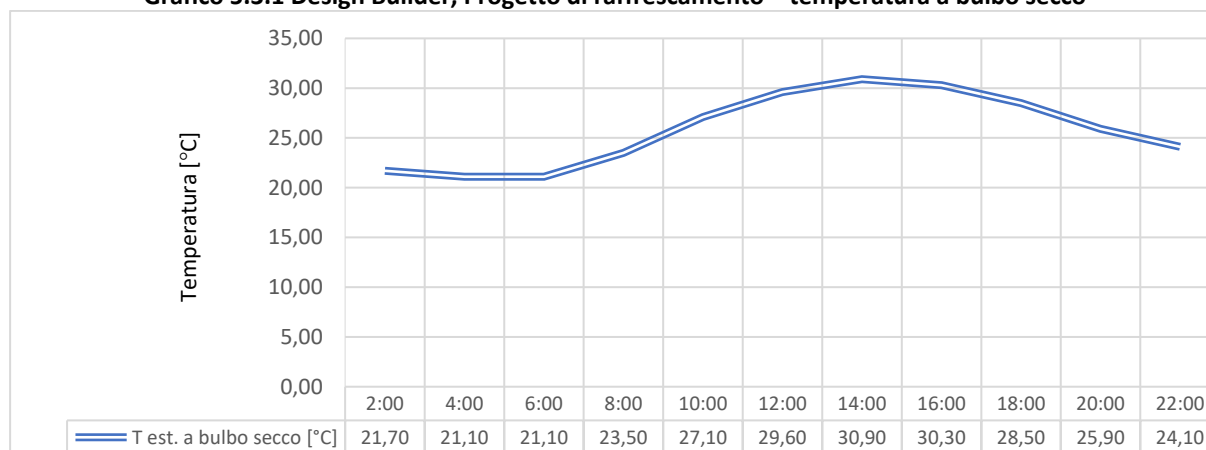
| Perdite di calore               |                         |
|---------------------------------|-------------------------|
| Vetrate                         | -3,56 W/m <sup>2</sup>  |
| Pareti                          | -4,63 W/m <sup>2</sup>  |
| Soffitti interni                | 0,06 W/m <sup>2</sup>   |
| Pavimenti interni               | 0,15 W/m <sup>2</sup>   |
| Partizioni interne              | 0,94 W/m <sup>2</sup>   |
| Infiltrazione esterna           | -8,23 W/m <sup>2</sup>  |
| Ventilazione esterna            | -82,61 W/m <sup>2</sup> |
| Riscaldamento sensibile di zona | 97,75 W/m <sup>2</sup>  |

Si può notare come la ventilazione esterna rappresenti la quota di dispersione maggiore, mentre le infiltrazioni esterne siano di un ordine di grandezza inferiore; quest'ultimo dato è frutto della scelta effettuata in fase progettuale di sostituire i vecchi serramenti a singolo vetro con nuovi in legno dotati di doppio vetro e vetrocamera isolante. La potenza di riscaldamento totale di progetto, invece, risulta essere pari a  $97,75 \text{ W/m}^2$ , la quale moltiplicata per sommatoria delle superfici degli alloggi, risulta pari a  $150,73 \text{ kW}$ . Tuttavia occorre tenere presente che il software non consideri né i guadagni solari diretti né i guadagni generati dalle fonti interne.

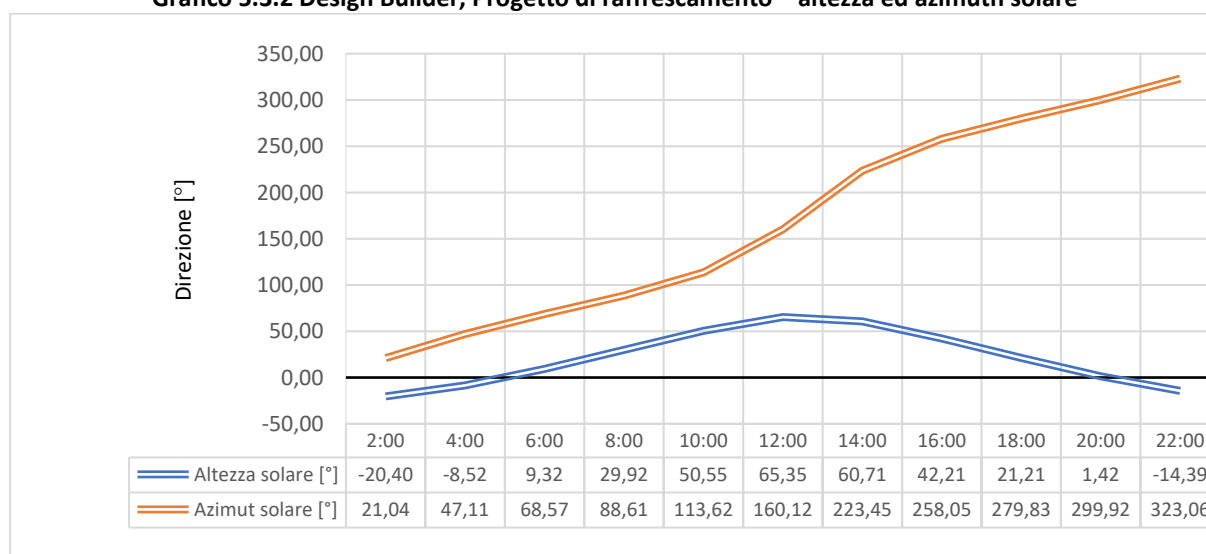
### 5.3 Calcolo del carico termico estivo

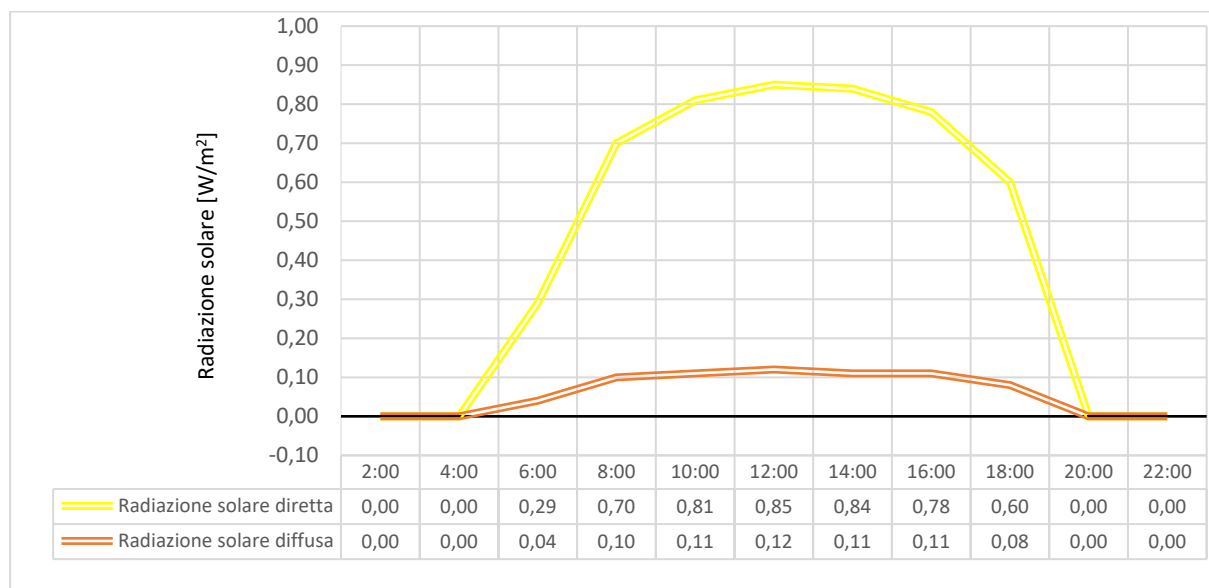
Il calcolo del carico termico estivo viene eseguito dal programma mediante il pulsante “Progetto di Raffrescamento” svolto in regime stazionario il 15 luglio, ovvero il giorno più caldo dell'anno. L'output di questo comando è una serie di grafici, nei quali vengono riportati l'andamento delle temperature, il bilancio termico, il raffrescamento sensibile e totale, l'umidità relativa e l'andamento della ventilazione meccanica, naturale e infiltrazioni. Selezionando “Dati del luogo”, si possono ottenere una serie di grafici, nei quali si possono notare l'andamento della temperatura a bulbo secco [°C], la pressione atmosferica [Pa], la radiazione solare diretta e la radiazione solare diffusa [ $\text{W/m}^2$ ] e l'altezza e l'azimut solare [°].

**Grafico 5.3.1 Design Builder, Progetto di raffrescamento – temperatura a bulbo secco**



**Grafico 5.3.2 Design Builder, Progetto di raffrescamento – altezza ed azimuth solare**



**Grafico 5.3.3 Design Builder, Progetto di raffrescamento – radiazione solare**

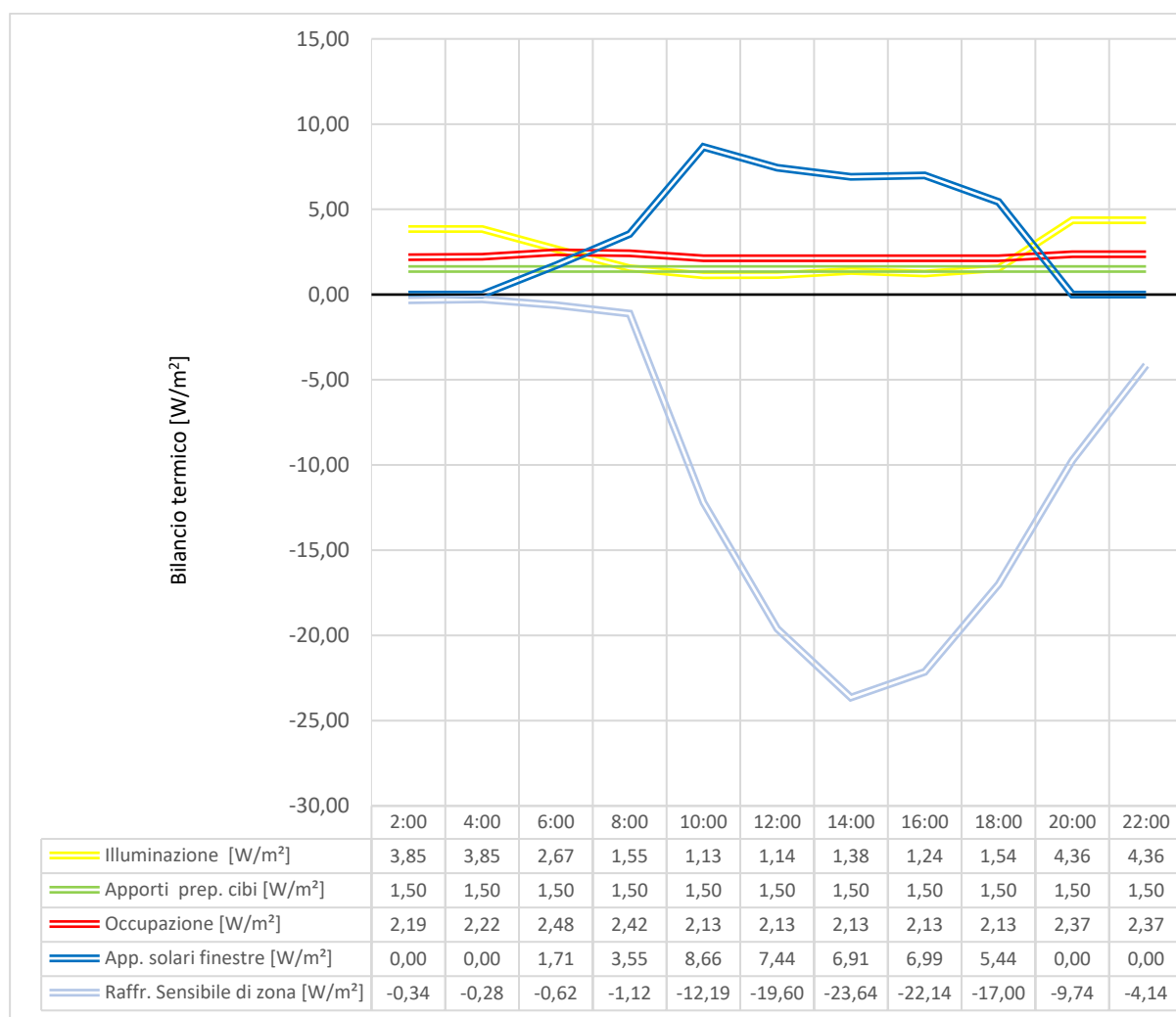
Selezionando il secondo comando “Confort” è possibile notare l’andamento della temperatura dell’aria interna, la temperatura radiante, operante ed esterna a bulbo secco. Tale grafico è molto importante per capire il grado di confort interno. Per percepire al meglio l’andamento delle temperature, è stato scelto di impostare il valore dell’asse delle ascisse pari a 20°C.

**Grafico 5.3.4 Design Builder, Confort – Temperature**

Si può notare come la temperatura interna dell'aria oscilli attorno ai 26° C prima delle 10:00 di mattina, stabilizzandosi ai 26,00° C nelle ore successive, rispettando la temperatura di set point fornita dalla UNI/TS 11300-1 per la climatizzazione estiva. La temperatura radiante, invece, mantiene dei valori più alti rispetto a quella dell'aria interna, di conseguenza anche la temperatura operante risulta essere superiore ai 26,00° C. In particolare, la temperatura operante raggiunge un valore massimo pari a 26,46°C dalle 16:00 alle 18:00.

Successivamente è stato ricavato il grafico "Apporti interni e solari" 5.3.5., nel quale si può notare l'andamento giornaliero degli apporti interni generati dall'illuminazione interna dell'edificio, dall'occupazione, gli apporti solari attraverso le superfici vetrate, l'infiltrazione esterna e il bilancio termico degli elementi opachi.

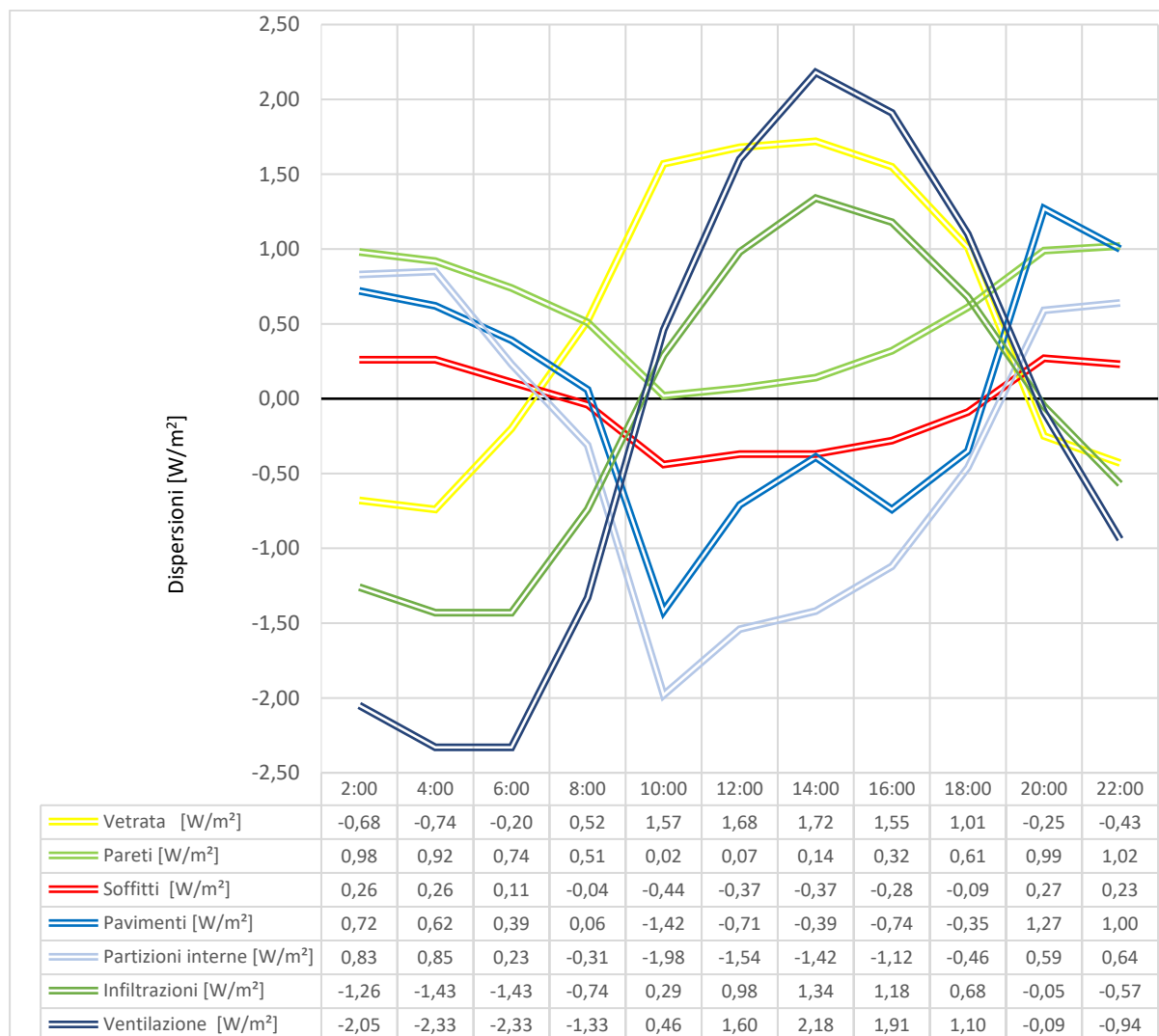
**Grafico 5.3.5 Design Builder, Progetto di raffrescamento – apporti interni e solari**



Si può osservare come l'illuminazione raggiunga un valore massimo pari a 4,36 W/m² alle 20:00; tale valore è giustificato dal fatto che in quell'ora la maggior parte degli occupanti si trovano nella propria abitazione. Per quanto riguarda il fabbisogno di raffrescamento sensibile di zona, risulta avere un picco pari a 23,64 W/m² alle 14:00; se moltiplicato per la sommatoria delle superfici occupate, si ottiene un valore pari a 37,82 kW.

Infine, selezionando “Involucro e ventilazione”, è stato ricavato il grafico delle quantità dei flussi termici dispersi attraverso i componenti edilizi e dei flussi entalpici connessi con le portate di aria di ventilazione ed infiltrazione esterne.

**Grafico 5.3.6 Design Builder, Progetto di raffrescamento – involucro e ventilazione**



## 5.4 La simulazione dinamica

Grazie al comando “simulazione” è possibile svolgere l’analisi in regime dinamico dell’intero anno solare, mediante la quale si ottengono i dati climatici di Torino e i parametri relativi i consumi dell’intero edificio oggetto di studio. In particolare, è possibile osservare come si sviluppino le variabili termiche che influiscono sul comportamento energetico dell’edificio. Nel caso in esame è stato scelto di eseguire una simulazione per il periodo invernale e una per il periodo estivo in modo separato. È stata presa questa scelta perché trattandosi di un edificio di cinque piani, il software riscontrava difficoltà ad eseguire una simulazione per tutto l’anno, con problemi di ravviamento del software. Oltre ad impostare l’arco temporale è stato impostato l’intervallo di simulazione mensile, annuale e giornaliero, il numero di step di calcolo pari a quattro ore ed è stata attivata l’opzione relativa agli ombreggiamenti dovuti agli edifici limitrofi che sono stati inseriti in fase di modellazione.

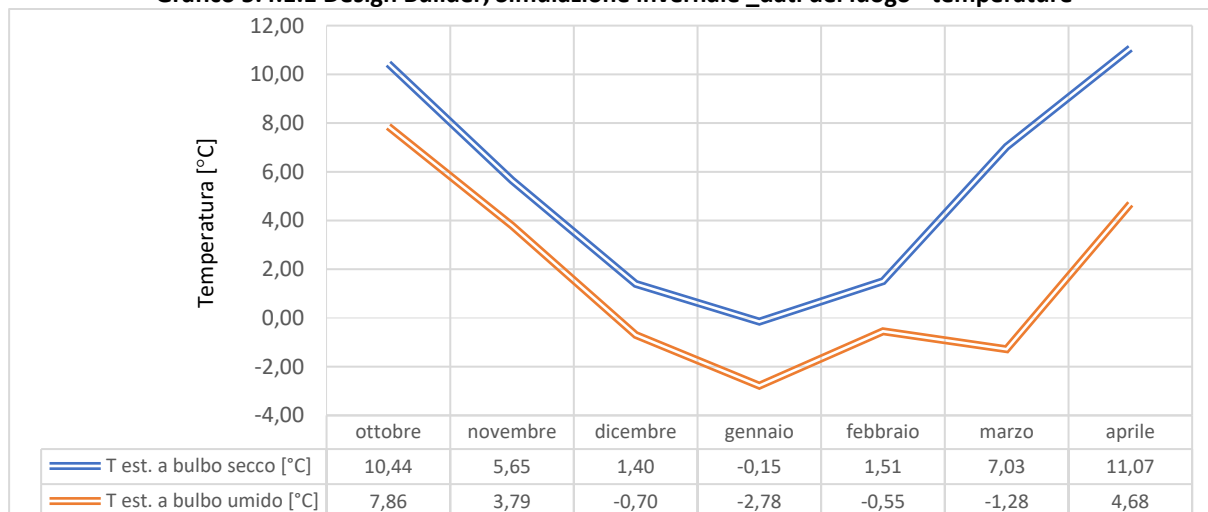
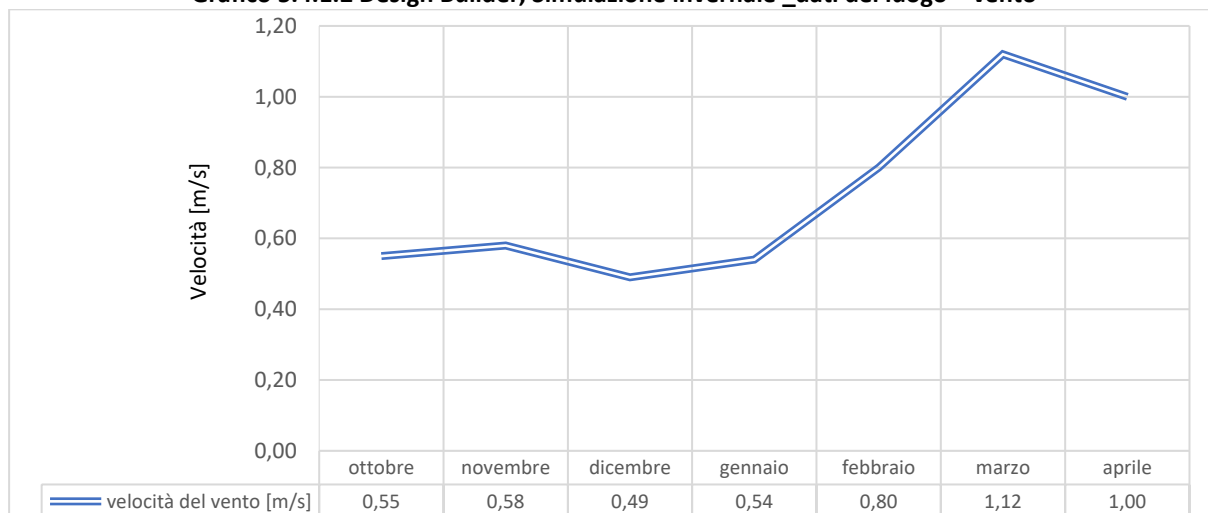
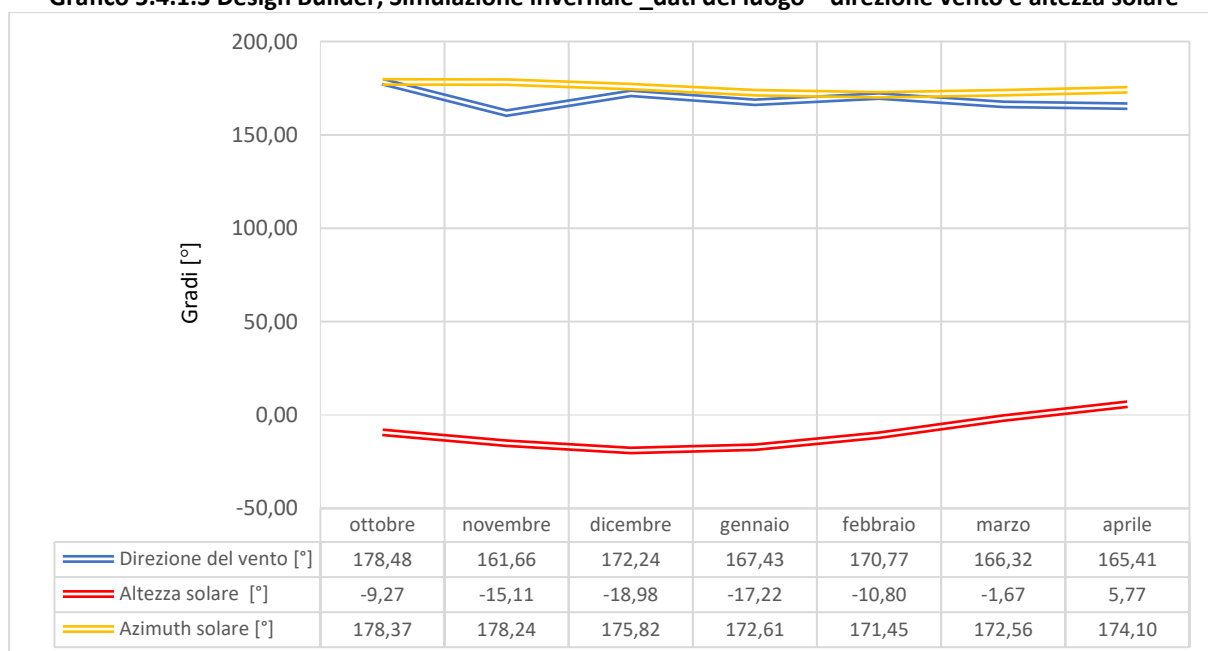
### 5.4.1 Periodo invernale

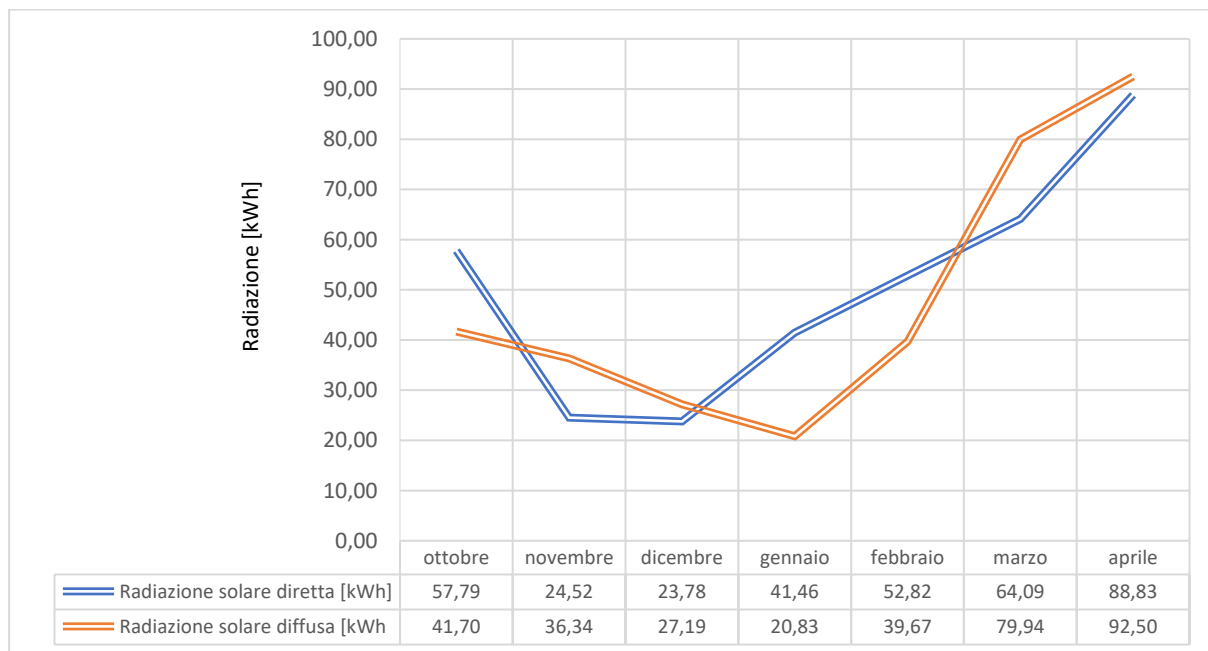
Avviando il comando simulazione si apre la finestra “Modifica Opzioni di calcolo”, mediante la quale è possibile impostare le opzioni per controllare la simulazione e il relativo output. In particolare grazie al primo pannello “Generale” è possibile impostare il periodo di simulazione e gli intervalli per la generazione dei risultati; nel caso in esame è stata impostata quindi la stagione di riscaldamento convenzionale che inizia il 15 ottobre e termina il 15 aprile. Grazie al secondo pannello “Opzioni” è possibile selezionare gli step temporali per ora, da un minimo di due step ad un massimo di sessanta. Dato che aumentando il numero di step si migliora l’accuratezza del calcolo, ma nello stesso tempo la simulazione rallenta notevolmente, tale valore è stato impostato pari a quattro. Inoltre, è stata spuntata la voce che permette di includere tutti gli edifici per il calcolo delle ombre.

Nel terzo pannello “Output” è possibile selezionare i risultati che si vogliono ottenere sui grafici finali e infine il quarto pannello “Manager di Simulazione” permette di eseguire la simulazione in un processo separato mediante un server esterno. Una volta selezionata la casella, tale comando consente di continuare a lavorare sul modello mentre le simulazioni vengono eseguite in parallelo. Una volta stabilite le opzioni di simulazione si conferma e inizia il processo di simulazione. Nel primo grafico di output “Dati del luogo”, sono riportati i seguenti dati:

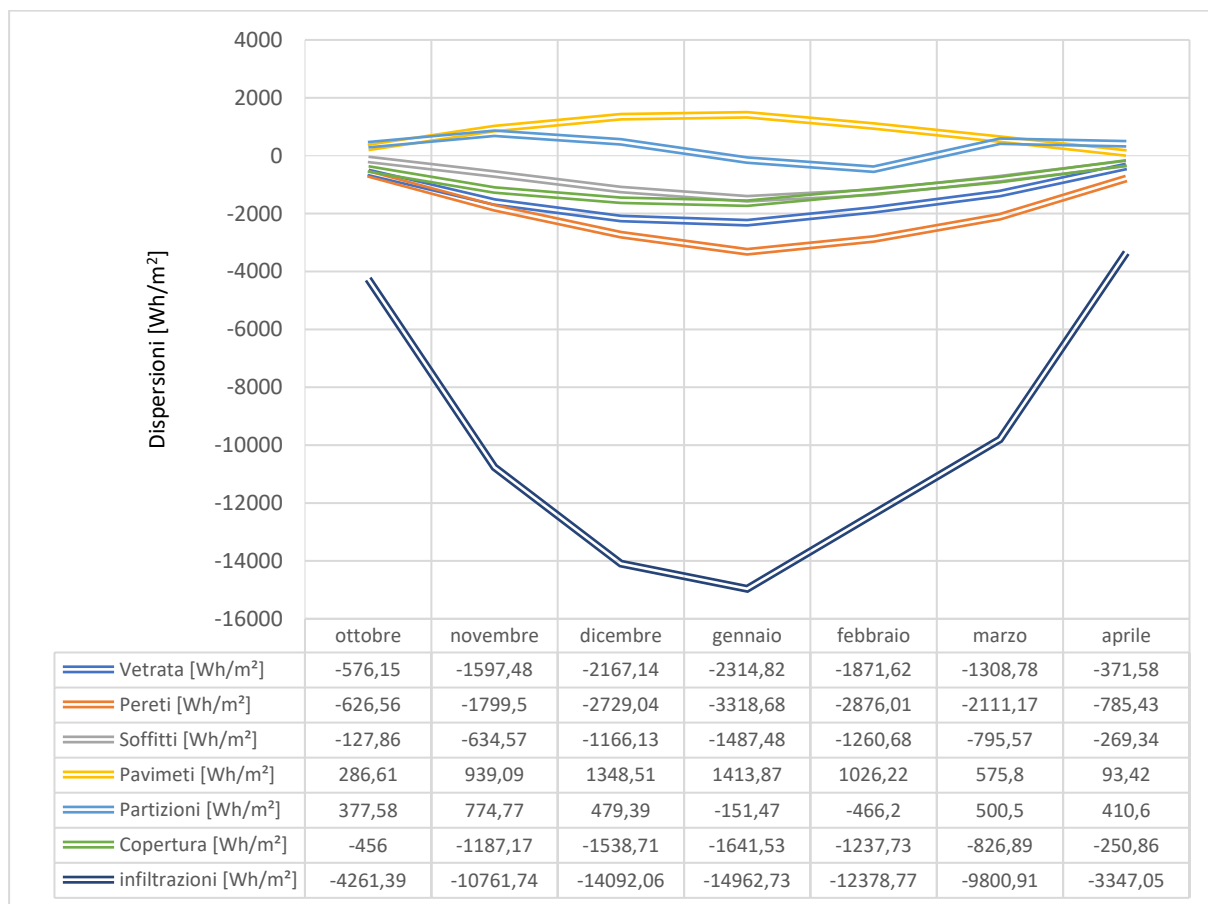
- temperatura bulbo secco e a bulbo umido [°C];
- velocità del vento [m/s];
- direzione del vento [°], Altezza solare [°], Azimuth solare [°];
- Pressione atmosferica [Pa];
- radiazione solare diretta [kWh] e radiazione solare diffusa [kWh].



**Grafico 5.4.1.1 Design Builder, Simulazione invernale \_dati del luogo - temperature****Grafico 5.4.1.2 Design Builder, Simulazione invernale \_dati del luogo – vento****Grafico 5.4.1.3 Design Builder, Simulazione invernale \_dati del luogo – direzione vento e altezza solare**

**Grafico 5.4.1.4 Design Builder, Simulazione invernale \_dati del luogo – radiazione solare**

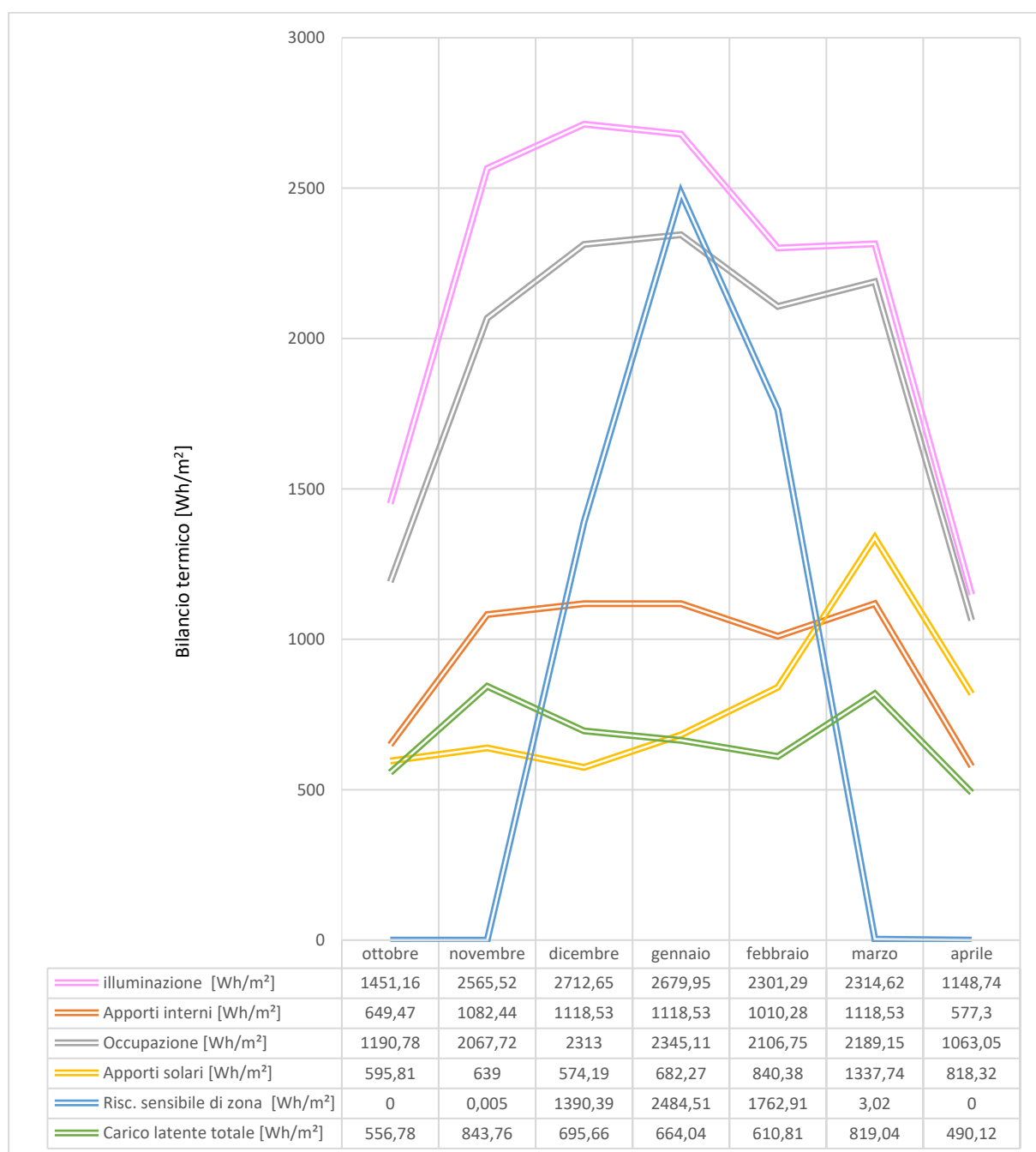
Mediante “Involucro e ventilazione” si possono osservare invece i valori relativi alle dispersioni dei componenti opachi e vetrati e le infiltrazioni esterne [Wh/m<sup>2</sup>];

**Grafico 5.4.1.5 Design Builder, Simulazione invernale – involucro e ventilazione**

Tramite “apporti interni e solari” invece, sono stati ottenuti i seguenti parametri di bilancio termico riportati nel grafico 5.4.1.6:

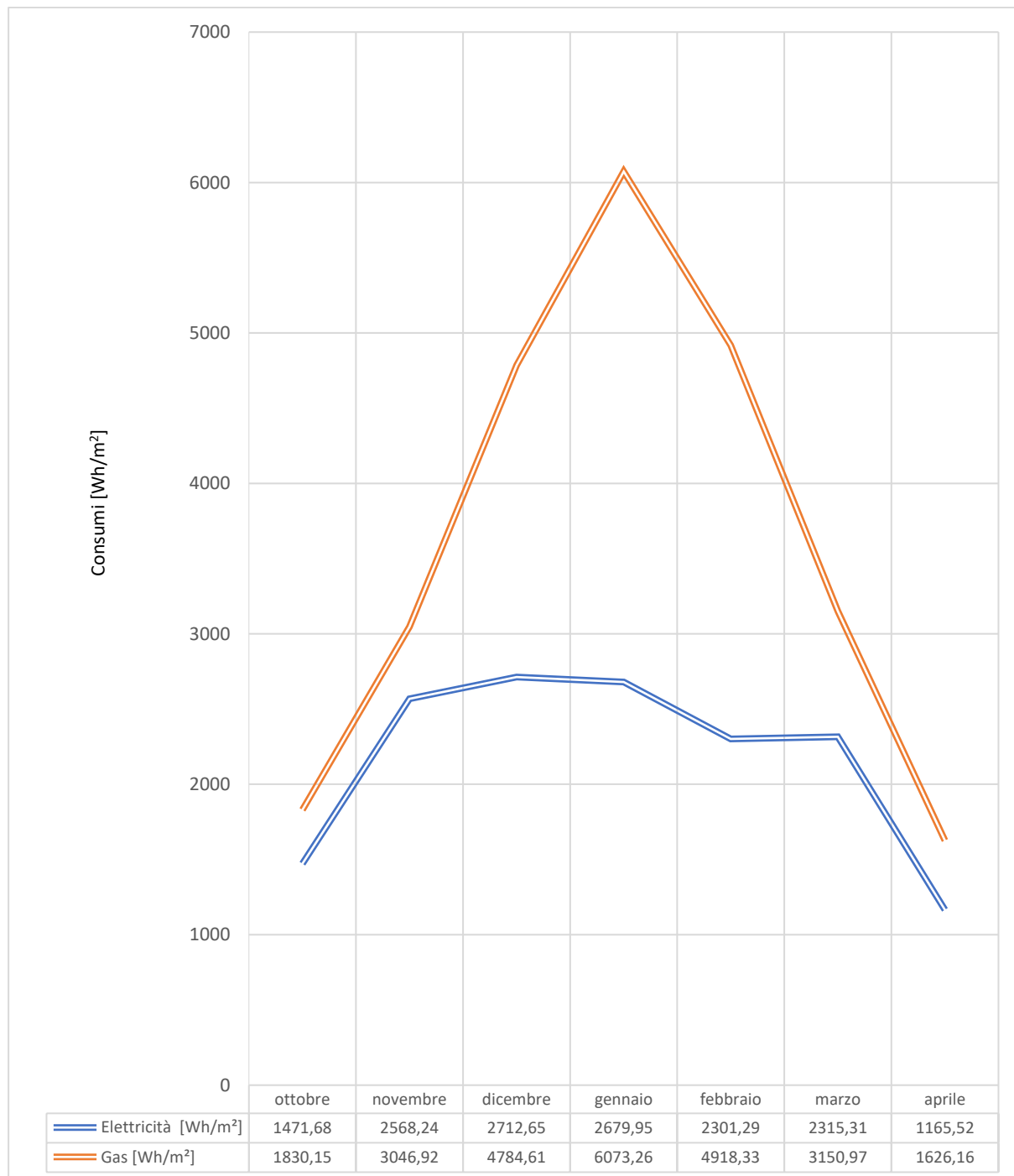
- Riscaldamento sensibile [Wh/m<sup>2</sup>];
- Illuminazione generale [Wh/m<sup>2</sup>];
- Apporti solari attraverso finestre esterne [Wh/m<sup>2</sup>];
- Carico endogeno dovuto alle persone [Wh/m<sup>2</sup>];
- Carico endogeno dovuto ai dispositivi interni [Wh/m<sup>2</sup>];

**Grafico 5.4.1.6 Design Builder, Simulazione invernale – apporti interni e solari**



Infine, mediante “Consumi totali”, è stato possibile ricavare i consumi di combustibile naturale e i consumi elettrici, entrambi espressi in Wh/m<sup>2</sup>:

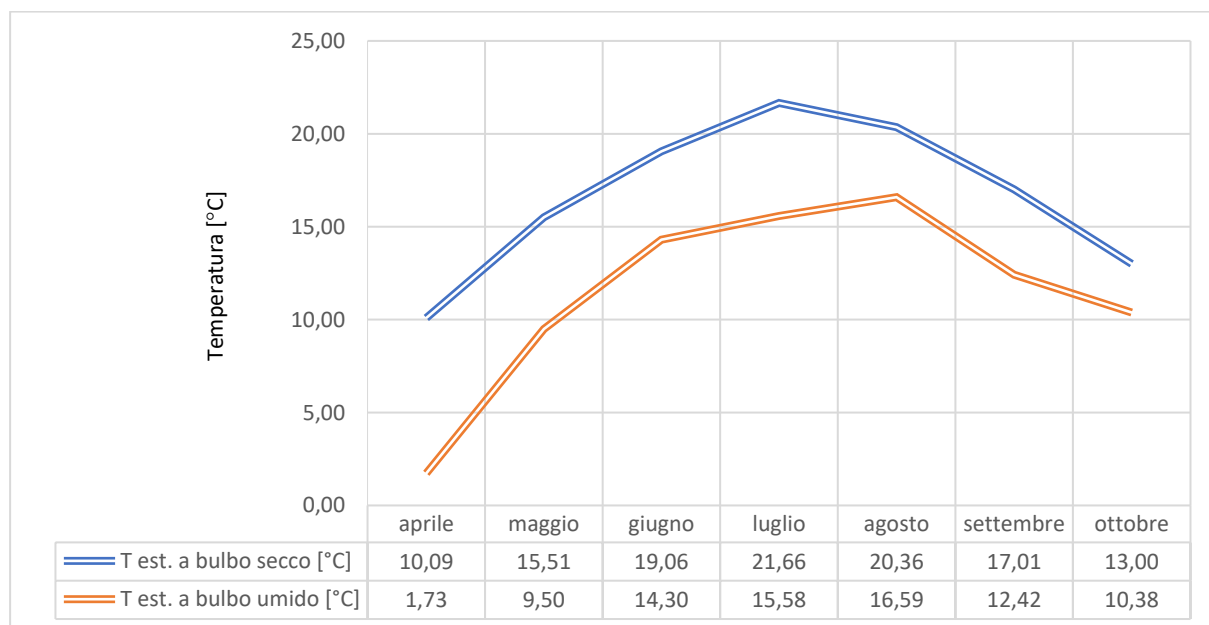
**Grafico 5.4.1.4 Design Builder, Simulazione invernale – consumi totali**



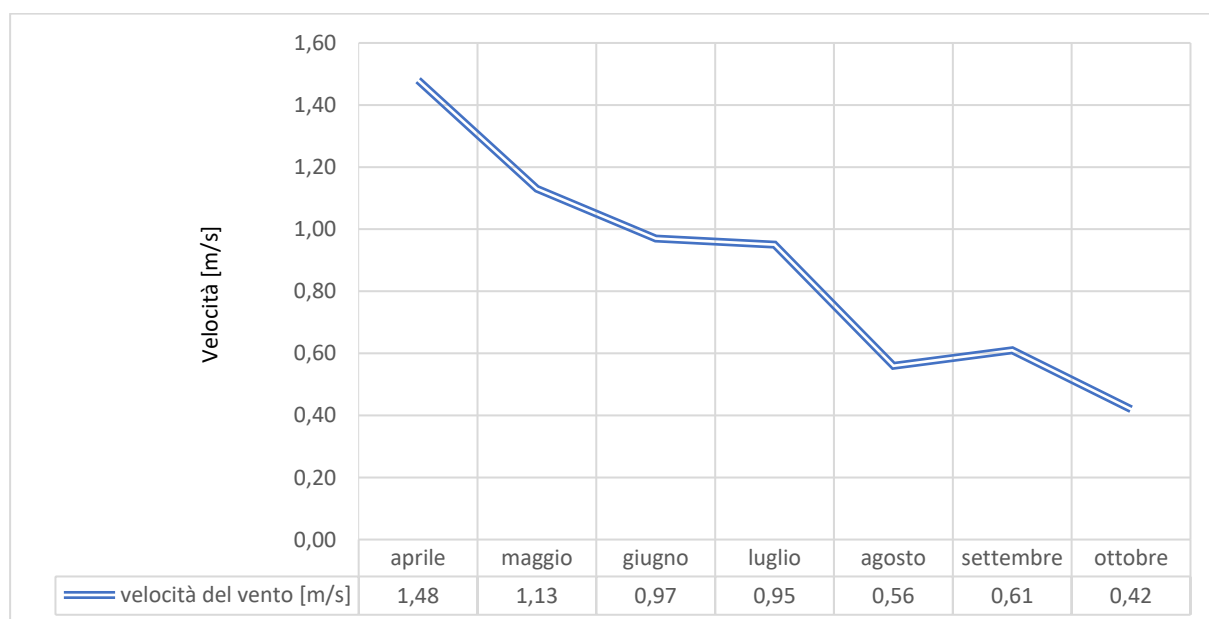
### 5.4.2 Periodo estivo

Successivamente si è passati all'analisi in regime dinamico del periodo estivo, nel quale sono state mantenute le stesse impostazioni adottate per il periodo invernale, tranne ovviamente il giorno iniziale e finale, i quali sono stati impostati rispettivamente il 16 aprile e il 14 ottobre. Nella prima serie di grafici relativi all'output "Dati del luogo", sono stati ricavati i seguenti dati:

**Grafico 5.4.2.1 Design Builder, Simulazione estiva \_dati del luogo – temperature**



**Grafico 5.4.2.2 Design Builder, Simulazione estiva \_dati del luogo – vento**



**Grafico 5.4.2.3 Design Builder, Simulazione estiva \_dati del luogo – direzione vento e sole****Grafico 5.4.2.4 Design Builder, Simulazione estiva \_dati del luogo – radiazione solare**

Tramite “Involucro e ventilazione” sono stati ricavati i seguenti dati:

- bilancio termico [kWh] dei componenti disperdenti opachi e vetrati e le infiltrazioni esterne [kWh];
- ricambi d'aria per ora [vol/h]

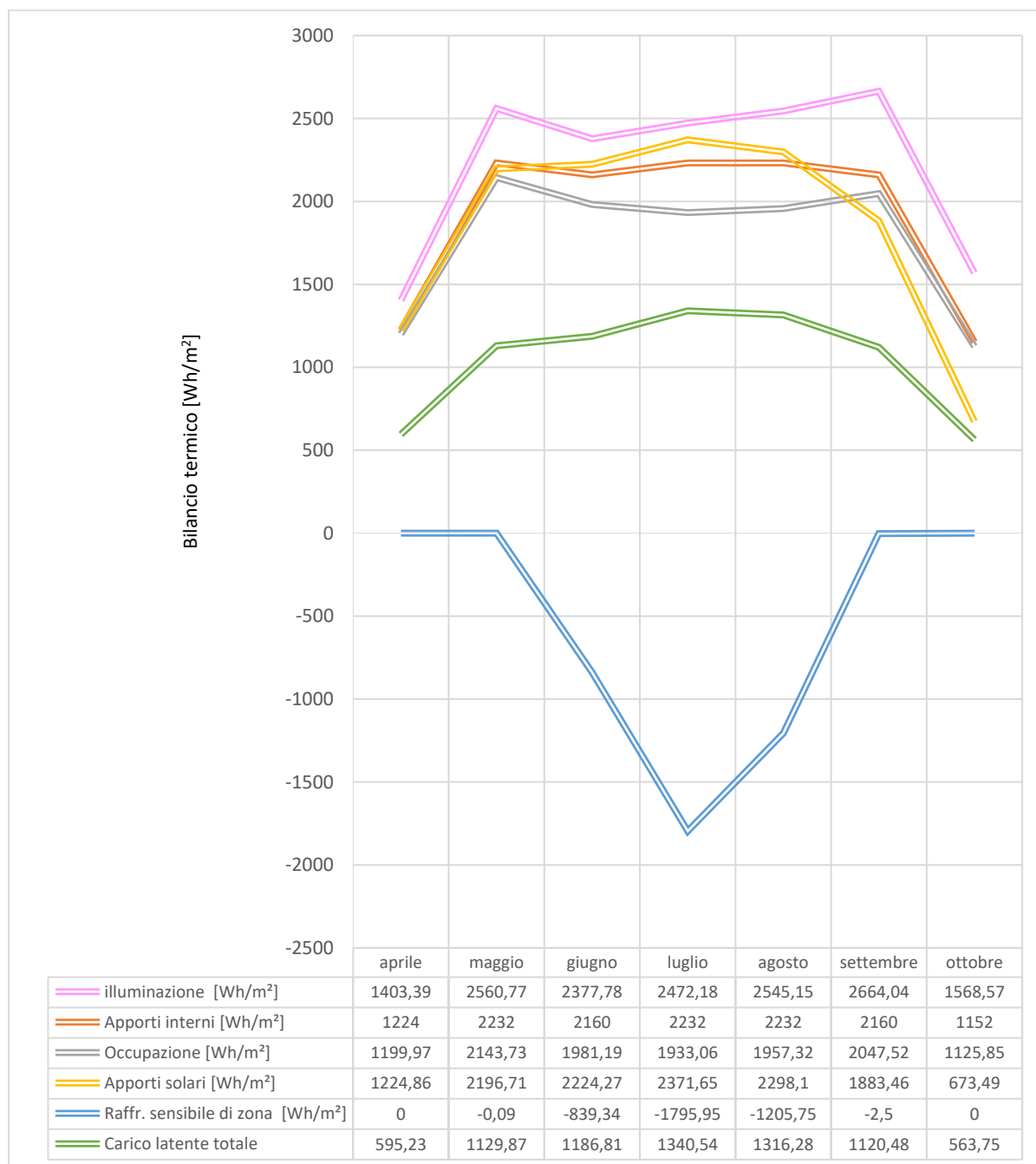
**Grafico 5.4.2.5 DesignBuilder, Simulazione estiva – involucro e ventilazione**



Nel grafico 5.4.2.6 sono riportati i parametri relativi al bilancio termico, ottenuti mediante l'output "apporti interni e solari", nello specifico:

- Raffrescamento sensibile di zona [ $\text{Wh/m}^2$ ];
- Illuminazione generale [ $\text{Wh/m}^2$ ];
- Apporti solari attraverso finestre esterne [ $\text{Wh/m}^2$ ];
- Carico endogeno dovuto alle persone [ $\text{Wh/m}^2$ ];
- Carico endogeno dovuto ai dispositivi interni [ $\text{Wh/m}^2$ ];

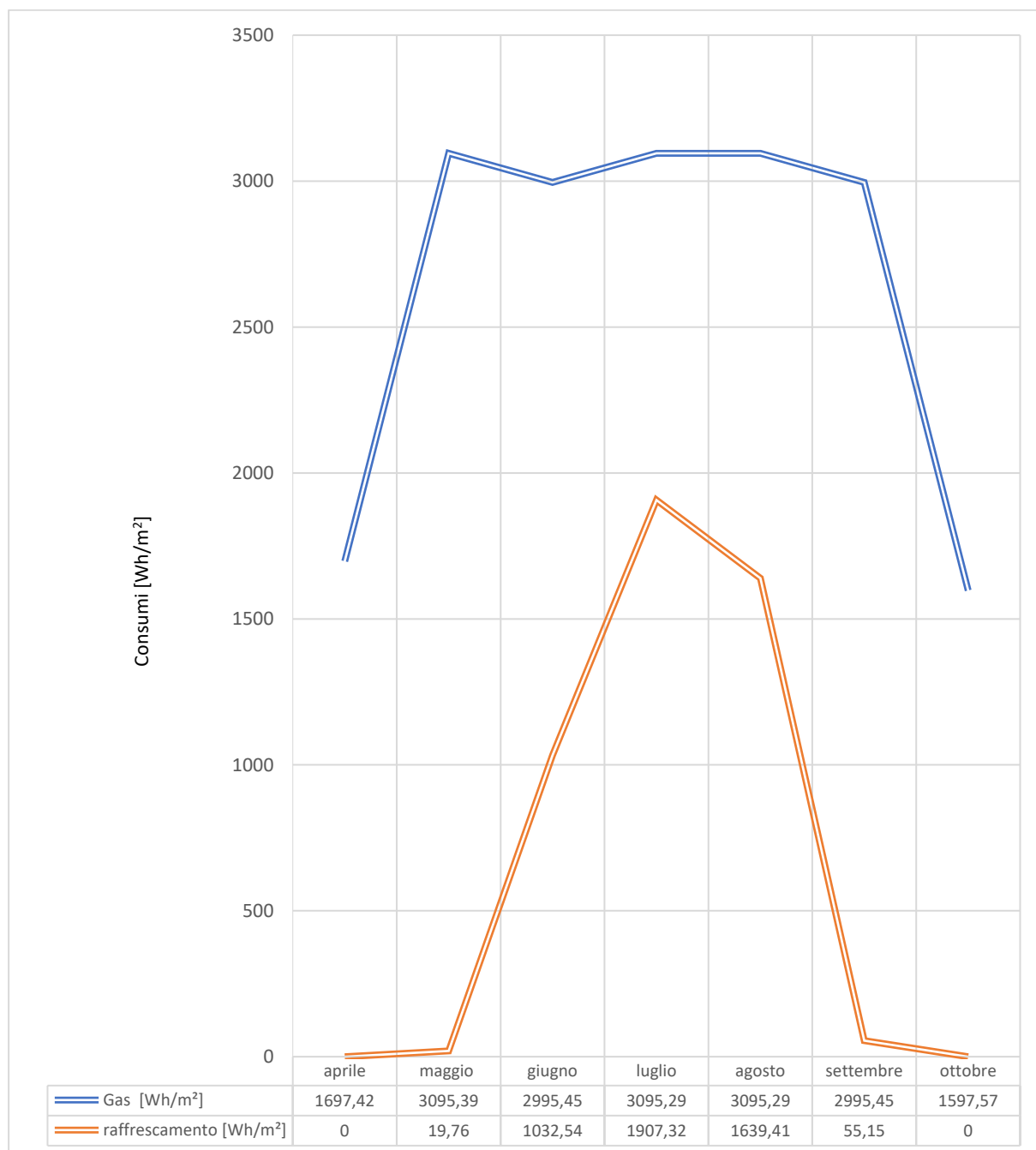
**Grafico 5.4.2.6 Design Builder, Simulazione estiva – apporti interni e solari**





Nell'ultimo grafico, infine, sono indicati i valori relativi ai consumi relativi al condizionamento e al gas espressi in Wh/m<sup>2</sup>, ottenuti mediante l'impostazione "Consumi totali":

**Grafico 5.4.2.7 Design Builder, Simulazione estiva – consumi totali**



## Capitolo 6- Analisi e discussione dei risultati

### 6.1 Confronto tra stato attuale e progetto

Fino ad ora è stata posta l'attenzione sul progetto di riqualificazione dell'edificio ed è stata eseguita una prima modellazione, mediante la quale si sono ottenuti i risultati descritti nel capitolo precedente.

Partendo dalle scelte progettuali adottate si è ritornati al punto di partenza, in cui l'edificio si presentava allo stato attuale, per valutare l'efficacia delle soluzioni adottate e le prestazioni dell'edificio stesso.

A tale proposito successivamente vengono riportati i confronti più significativi tra lo stato attuale e quello progettuale. Per rendere le analisi più comprensibili e immediate, è stato deciso di suddividere ogni parametro (fabbisogni, apporti, ecc.) in diversi paragrafi.

#### 6.1.1 Fabbisogno di riscaldamento e di raffrescamento

Nella tabella 6.1.1 vengono riportati i valori del fabbisogno per il riscaldamento invernale " $Q_h$ " e per la climatizzazione estiva " $Q_c$ " dei due casi oggetto di confronto.

**Tabella 6.1.1 – Confronto\_Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento**

| Fabbisogni di energia |             |             |
|-----------------------|-------------|-------------|
|                       | $Q_h$ [KWh] | $Q_c$ [KWh] |
| Stato attuale         | 13'204,43   | 15'973,22   |
| Stato progettuale     | 8'252,77    | 12'193,30   |
| Miglioramento         | + 60%       | + 31%       |

Nella pagina successiva si riportano i grafici dei consumi separati, in modo tale da poter osservare l'andamento durante l'anno del combustibile che i due sistemi edificio-impianto richiedono per garantire le condizioni di set point immesse. Tramite queste simulazioni è possibile notare l'andamento e l'incidenza di ogni fonte di consumo durante l'anno.

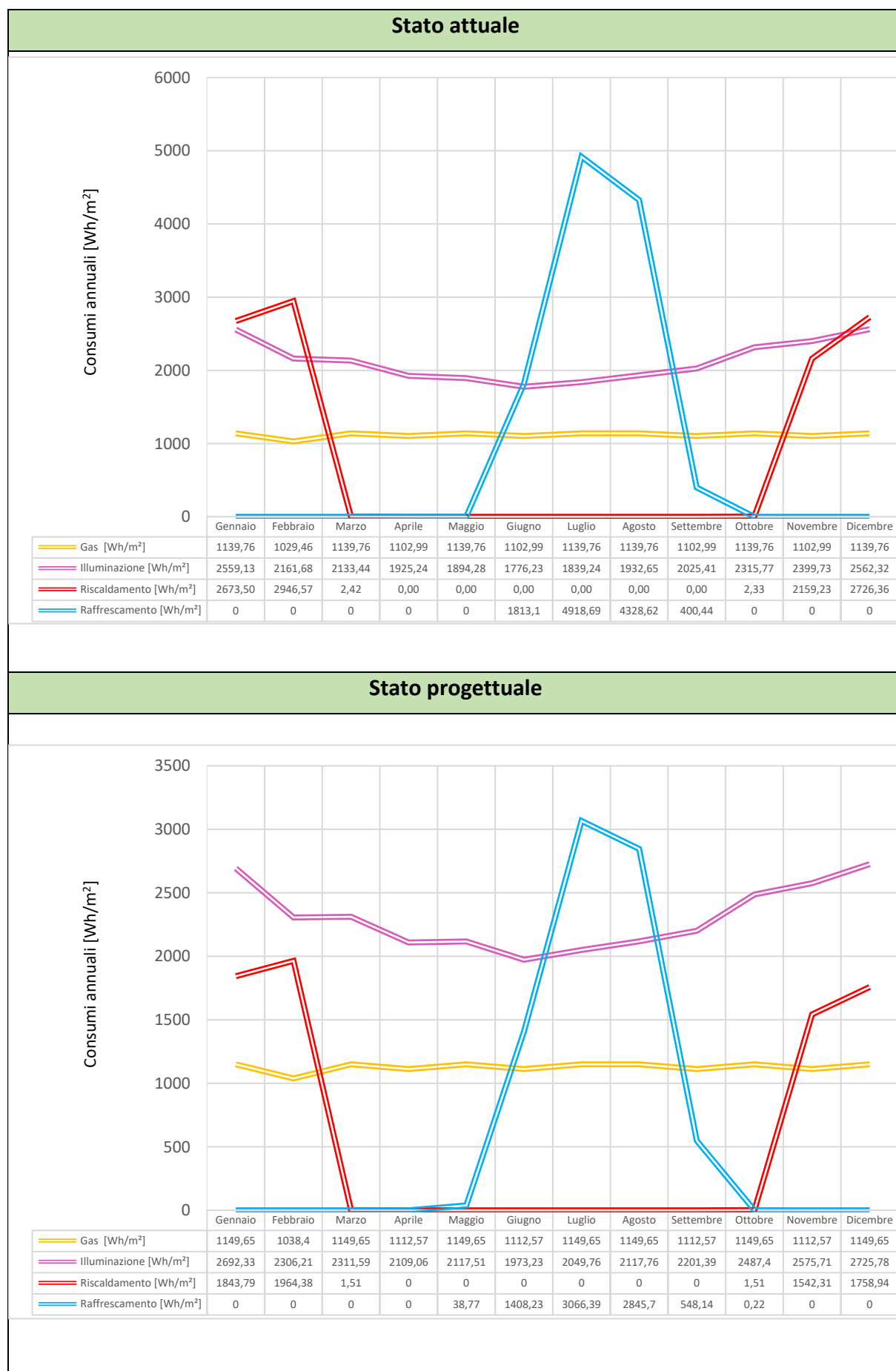
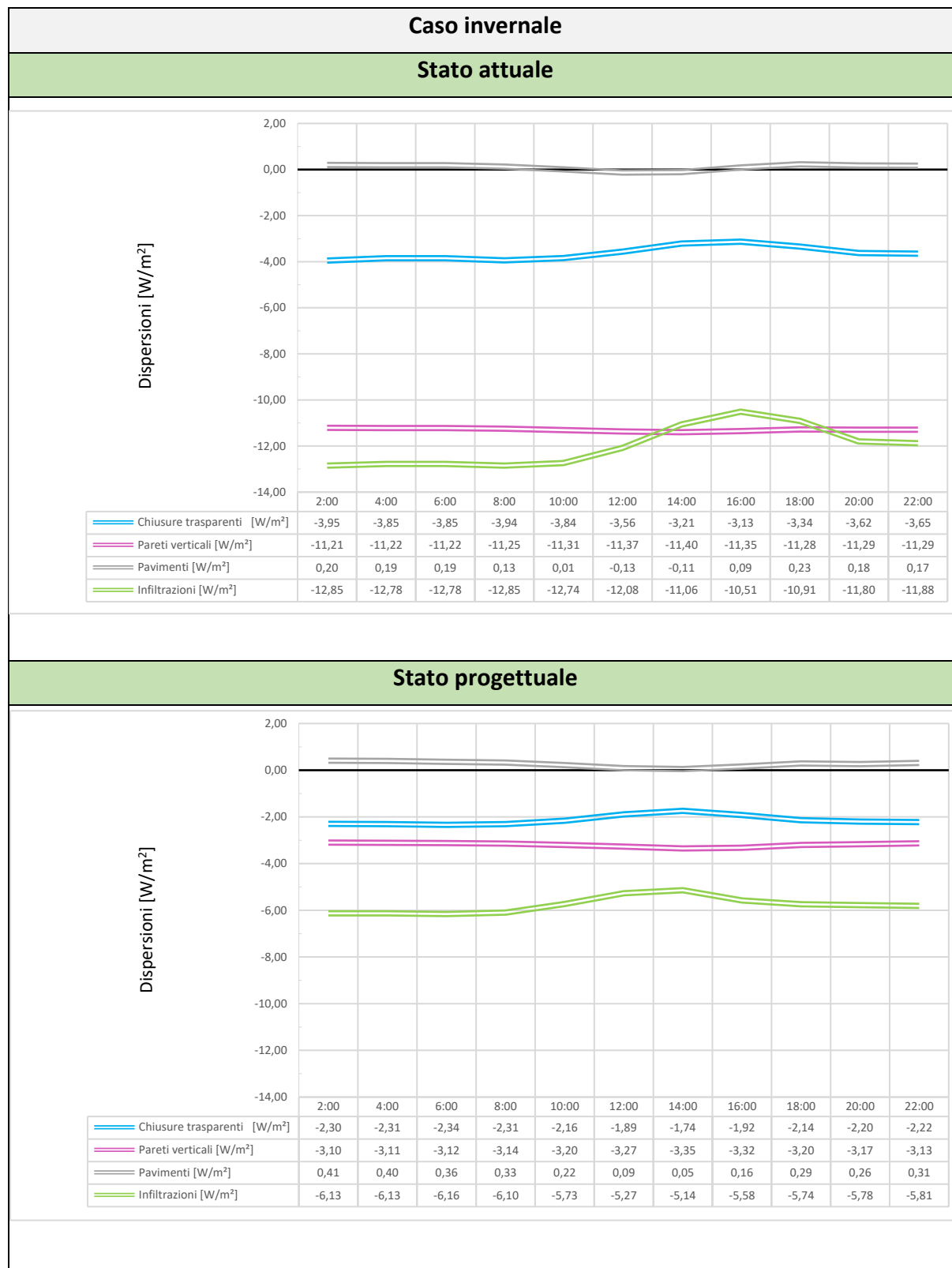


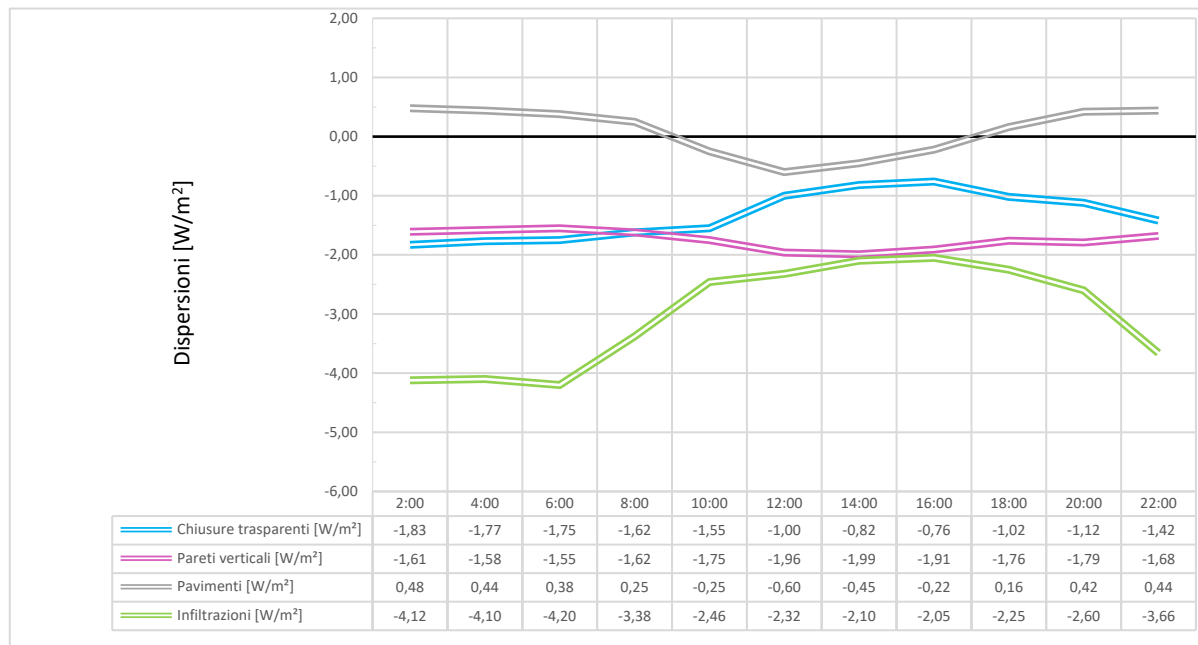
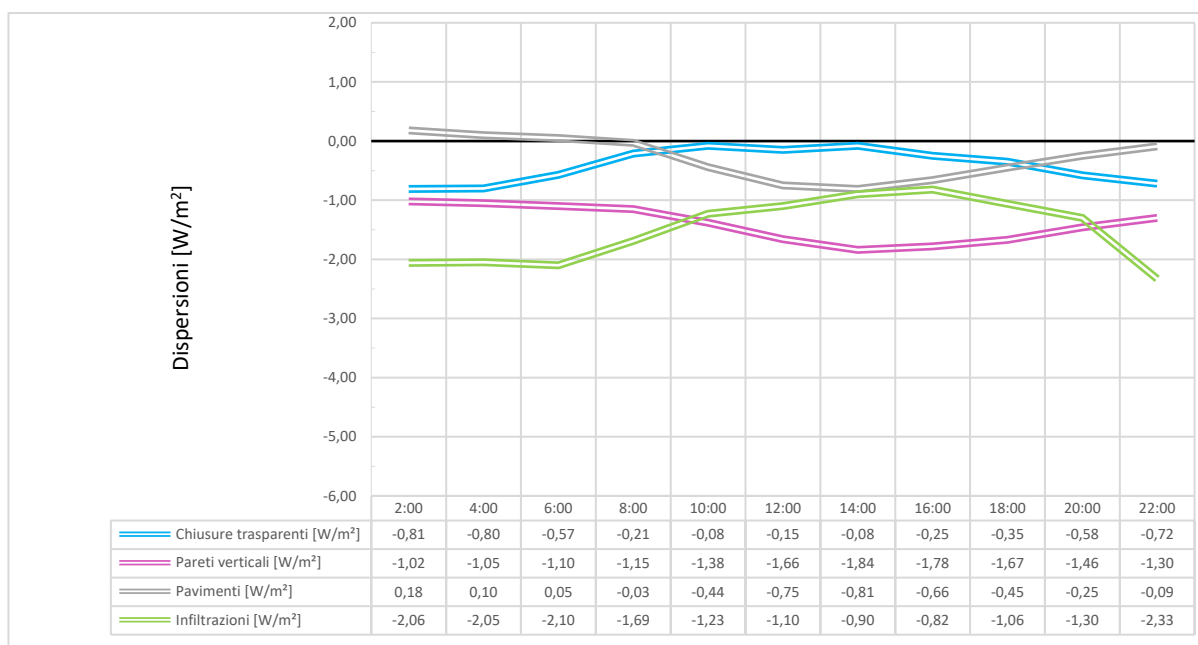
Tabella 6.1.1.1 Design Builder, Consumi separati – confronto stato di fatto-stato progettuale

### 6.1.2 Comportamento pareti, solai e vetrate

Per confrontare il comportamento termico dei due casi, stato attuale e progetto, è stata eseguita una simulazione il 21 gennaio per il caso invernale e una il 21 luglio per quello estivo, in modo tale da studiare e confrontare il comportamento dei componenti opachi e vetrati.



**Tabella 6.1.2.1 Design Builder, Bilancio termico invernale – confronto stato di fatto-stato progettuale**

**Caso estivo****Stato attuale****Stato progettuale****Tabella 6.1.2.2 Design Builder, Bilancio termico estivo – confronto stato di fatto-stato progettuale**

Osservando i primi due grafici relativi alla situazione invernale del 21 gennaio, si può notare che:

- le perdite di calore dovute ai flussi entalpici connessi alle portate di aria di infiltrazione (in verde) hanno un andamento simile per entrambi casi. Si può notare, però, che nel caso dello stato attuale tale linea risulta essere traslata verso il basso di un valore pari a  $6 \text{ W/m}^2$ ; questo è stato reso possibile grazie alle soluzioni adottate per l'involucro esterno, le quali hanno portato ad una diminuzione del 50% delle portate di aria di infiltrazione.
- La quantità delle dispersioni degli elementi trasparenti (in azzurro) diminuisce in seguito all'adozione dei nuovi serramenti; si può constatare, infatti, che il valore di picco subisce una diminuzione da  $3,95 \text{ W/m}^2$  a  $2,30 \text{ W/m}^2$ , mentre nell'arco dell'intera giornata si registra un calo delle dispersioni attraverso gli elementi vetrati pari al 41%.
- le dispersioni tramite le superfici opache verticali (in viola) continuano ad avere un andamento simile, ma grazie alle soluzioni adottate, quello dello stato progettuale risulta essere traslato di un offset di circa  $8 \text{ W/m}^2$ . In altri termini, le soluzioni adottate per correggere i ponti termici, hanno portato ad una diminuzione delle dispersioni delle pareti esterne pari al 71%
- Infine, analizzando gli elementi opachi orizzontali (in grigio), si può osservare che per quanto riguarda lo stato attuale, tale andamento sia prossimo allo zero; questo significa che non vi è scambio termico. Nello stato di progetto, invece, tale andamento è positivo. Questo è dovuto al fatto che, grazie alle nuove stratigrafie adottate, i solai possiedono un inerzia termica per cui rilasciano all'ambiente contributi di natura radiativa. Questi ultimi intervengono sul bilancio di energia riducendo il carico sull'impianto.

Per quanto riguarda la situazione estiva, invece, tramite la simulazione effettuata il 21 luglio si può osservare che:

- l'andamento della radiazione solare entrante attraverso le superfici trasparenti (in azzurro) cambia notevolmente dallo stato attuale allo stato progettuale. La scelta di sostituire i vecchi serramenti a singolo vetro con nuovi in legno dotati di doppio vetro e vetrocamera isolante, garantisce infatti una diminuzione degli apporti solari pari al 70%;
- il flusso termico scambiato attraverso le pareti (in viola) si riduce del 21%. Inoltre, nello stato attuale, le pareti rilasciano la maggior parte del calore all'interno dei locali a partire dalle 12:00, mentre nello stato progettuale dalle 14:00. L'aumento del periodo di sfasamento pari a due ore e la diminuzione del flusso termico entrante, permettono di ottenere un risparmio energetico dell'impianto di raffrescamento.
- considerando i flussi connessi con le portate di aria di infiltrazione (in verde) si può notare, infine, che l'edificio di progetto presenta un'andamento più lineare e nell'arco delle ventiquattro ore si ha una diminuzione complessiva pari al 51%.

### 6.1.3 Apporti interni

In questo paragrafo si osservano gli apporti interni, con particolare attenzione agli apporti solari in quanto giocano un ruolo fondamentale nel calcolo del fabbisogno per il raffrescamento estivo. Per studiare i flussi che entrano in gioco, è stata eseguita una simulazione annuale con intervalli mensili.



**Tabella 6.1.3.1 Design Builder, Apporti interni – confronto stato di fatto-stato progettuale**

Osservando i grafici relativi agli apporti interni si può notare:

- l'asse delle ordinate riporta i valori relativi ai consumi in  $\text{Wh/m}^2$ ; questo è dovuto al fatto che le simulazioni sono state impostate in funzione ai locali realmente occupati;
- l'andamento del consumo relativo al riscaldamento (in rosso) è quello subisce un cambiamento maggiore; nel caso attuale, infatti, il consumo di picco è pari a  $14'880 \text{ Wh/m}^2$  mentre nel caso di progetto è pari a  $1'669 \text{ Wh/m}^2$ ;
- per quanto riguarda il consumo inerente al raffrescamento (in blu) la differenza tra lo stato attuale e il progetto, invece, è meno evidente; a luglio, infatti, allo stato di fatto il valore tocca un valore massimo pari a  $4'029 \text{ Wh/m}^2$  mentre in quello di progetto a  $3'809 \text{ Wh/m}^2$ ;
- la differenza tra gli apporti solari (in giallo) tra lo stato attuale e lo stato progettuale è sostanziale; questo è stato reso grazie alla scelta di adottare una nuova soluzione di schermatura solare mobile (persiana ad anta) sulle facciate rivolte su Via Garibaldi e su Via Sant'Agostino, le quali hanno permesso una riduzione pari al 30%.

#### 6.1.4 Considerazioni finali

Nella prima sezione si può notare immediatamente come gli interventi di riqualificazione previsti modifichino in maniera sostanziale il comportamento dell'edificio. Nella tabella 6.1.1.1.1, nella quale vengono riportati i valori del fabbisogno per il riscaldamento e per il raffrescamento, si può notare infatti come nello stato progettuale si raggiunga un risparmio del 60% nel primo caso e del 31% per il secondo.

Esaminando il comportamento termico degli elementi opachi verticali, si ha nel caso invernale una diminuzione del 71% delle dispersioni di calore verso l'esterno, mentre nel caso estivo la radiazione solare incidente sulla parte esterna di tali superfici, gravano sul carico termico il 21% in meno. Questi risultati sono stati ottenuti grazie alle opere di isolamento esterno ed interno delle pareti perimetrali ed al taglio termico dei balconi. Grazie all'isolamento a cappotto, infine, è stato aumentato il periodo di sfasamento di due ore che nel caso estivo permette di ottenere un ulteriore risparmio energetico dell'impianto di raffrescamento. Si osserva che se non ci fossero stati i vincoli storici architettonici, si sarebbe optato per posare l'isolamento esterno anche sulle pareti che si affacciano su Via Garibaldi e Via Sant'Agostino e il numero di ore di sfasamento sarebbe aumentato ulteriormente. L'inerzia termica sul lato interno della parete, infatti, è legata alla capacità di accumulo dei primi dieci centimetri a contatto con l'aria interna, ma nello stesso tempo anche dalla posizione dello strato di isolamento: essendoci l'isolamento interno si annulla l'effetto benefico della massa della parete.

Per quanto riguarda gli elementi trasparenti, si dimostra inevitabile investire su nuovi infissi a doppio vetro e vetrocamera isolante. Nel caso invernale, infatti, nell'intera giornata del 21



gennaio si registra una riduzione del 41% delle dispersioni di calore verso l'esterno, mentre il 21 luglio si ha una riduzione degli apporti solari interni pari al 70%.

Osservando il comportamento degli elementi opachi orizzontali, si può constatare che grazie alle nuove stratigrafie proposte, i solai acquisiscono un'inerzia termica tale per cui gli permettono di rilasciare agli ambienti interni una parte dei flussi termici di natura convettiva. Cosa che allo stato attuale non accadeva in quanto l'andamento delle dispersioni si sovrapponeva all'asse delle ascisse, per cui non si verificava alcun scambio termico.

Infine, per quanto concerne i flussi entalpici connessi alle portate di aria di infiltrazione, grazie alle soluzioni adottate in fase preliminare, si verifica una diminuzione delle perdite pari al 50%. Questo dato è molto importante in quanto le infiltrazioni sono legate sia ai cambiamenti climatici esterni che alla permeabilità dell'edificio. I primi non sono governabili, per cui l'unico modo per diminuire le portate d'aria di infiltrazioni è agire sull'involucro. Solo in questa maniera si riesce a diminuire il carico sull'impianto di riscaldamento per mantenere le temperature interne di set-point.

## 6.2 Confronto tra progetto ed edificio di riferimento

Lo scopo del presente paragrafo consiste nel verificare le prestazioni delle tecnologie costruttive adottate in fase preliminare di progetto. Per raggiungere tale obiettivo occorre introdurre innanzitutto il concetto di "edificio di riferimento" come riportato nel Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici: *edificio identico in termini di geometria (sagoma, volumi, superficie calpestabile, superfici degli elementi costruttivi e dei componenti), orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e situazione al contorno, e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati.*

Come evidenziato dal Decreto, ai fini della determinazione dei requisiti costruttivi, l'edificio di riferimento o target si considera con gli stessi impianti di produzione di energia dell'edificio reale, quest'ultimo, nel caso in esame, coincide con l'edificio di progetto.

Per valutare le prestazioni degli elementi costruttivi dell'edificio di progetto è stato necessario creare, sempre nell'ambito della modellazione di DesignBuilder, l'edificio di riferimento in base ai parametri forniti dall'Appendice A del Decreto 26 giugno 2015.

Vengono riportati di seguito i valori dei parametri caratteristici dell'edificio di riferimento. Nel caso in esame, per la modellazione del fabbricato target, sono stati adottati i valori in vigore dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici ad uso pubblico e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli altri edifici.

**Tabella 6.2.1. Trasmittanza termica  $U$  delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o controterra**

| Zona climatica | U (W/m <sup>2</sup> K) |                          |
|----------------|------------------------|--------------------------|
|                | 2015 <sup>(1)</sup>    | 2019/2021 <sup>(2)</sup> |
| A e B          | 0,45                   | 0,43                     |
| C              | 0,38                   | 0,34                     |
| D              | 0,34                   | 0,29                     |
| E              | 0,30                   | 0,26                     |
| F              | 0,28                   | 0,24                     |



**Tabella 6.2.2. Trasmittanza termica  $U$  delle strutture opache orizzontali inclinate di copertura, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati o controterra**

| Zona climatica | U (W/m <sup>2</sup> K) |                          |
|----------------|------------------------|--------------------------|
|                | 2015 <sup>(1)</sup>    | 2019/2021 <sup>(2)</sup> |
| A e B          | 0,38                   | 0,35                     |
| C              | 0,36                   | 0,33                     |
| D              | 0,30                   | 0,26                     |
| E              | 0,25                   | 0,22                     |
| F              | 0,23                   | 0,20                     |



**Tabella 6.2.3. Trasmittanza termica  $U$  delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati o controterra**

| Zona climatica | U (W/m <sup>2</sup> K) |                          |
|----------------|------------------------|--------------------------|
|                | 2015 <sup>(1)</sup>    | 2019/2021 <sup>(2)</sup> |
| A e B          | 0,46                   | 0,44                     |
| C              | 0,40                   | 0,38                     |
| D              | 0,32                   | 0,29                     |
| E              | 0,30                   | 0,26                     |
| F              | 0,28                   | 0,24                     |



**Tabella 6.2.4. Trasmittanza termica  $U$  delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivo gli infissi, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati**

| Zona climatica | U (W/m <sup>2</sup> K) |                          |
|----------------|------------------------|--------------------------|
|                | 2015 <sup>(1)</sup>    | 2019/2021 <sup>(2)</sup> |
| A e B          | 3,20                   | 3,00                     |
| C              | 2,40                   | 2,20                     |
| D              | 2,00                   | 1,80                     |
| E              | 1,80                   | 1,40                     |
| F              | 1,50                   | 1,10                     |



**Tabella 6.2.5. Trasmittanza termica  $U$  delle strutture opache verticali e orizzontali di separazione tra edificio o unità immobiliari confinanti**

| Zona climatica | U (W/m <sup>2</sup> K) |                          |
|----------------|------------------------|--------------------------|
|                | 2015 <sup>(1)</sup>    | 2019/2021 <sup>(2)</sup> |
| Tutte le zone  | 0,8                    | 0,8                      |



Tramite il pannello “Costruzione”, sono stati impostati direttamente i valori di trasmittanza termica per ogni struttura dell’edificio. Successivamente sono state eseguite le simulazioni dinamiche per confrontarle con quelle effettuate precedentemente con l’edificio di progetto.

Vengono riportati i confronti più significativi tra il progetto e l’edificio di riferimento, e per rendere le analisi comprensibili e immediate, è stato deciso di continuare a suddividere i parametri di confronto più significativi in paragrafi.

### 6.2.1 Fabbisogno di riscaldamento e di raffrescamento

Nella tabella 6.2.1 vengono indicati i valori del fabbisogno per il riscaldamento invernale “ $Q_h$ ” e per la climatizzazione estiva “ $Q_c$ ” dei due casi in esame.

**Tabella 6.2.1.1 – Confronto\_Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento**

| Consumi           |             |             |
|-------------------|-------------|-------------|
|                   | $Q_h$ [kWh] | $Q_c$ [kWh] |
| Stato progettuale | 8'252,77    | 12'193,30   |
| Edificio target   | 7'554,43    | 12'002,90   |
| Miglioramento     | -8,5 %      | - 1,6 %     |

Come si evince dalla tabella di confronto, l’edificio di progetto ha una prestazione energetica estiva simile a quella dell’edificio di riferimento: il fabbisogno per la climatizzazione infatti, si discosta solo del 1,6%. Per quanto riguarda invece le prestazioni in regime invernale, il delta del fabbisogno risulta essere pari all’8,5%.

Nella pagina seguente si prosegue il confronto dei due edifici tramite i grafici dei consumi annuali separati. Grazie alla tabella 6.2.1.2 è possibile osservare l’andamento e l’incidenza di ogni fonte di consumo durante l’intero anno solare.

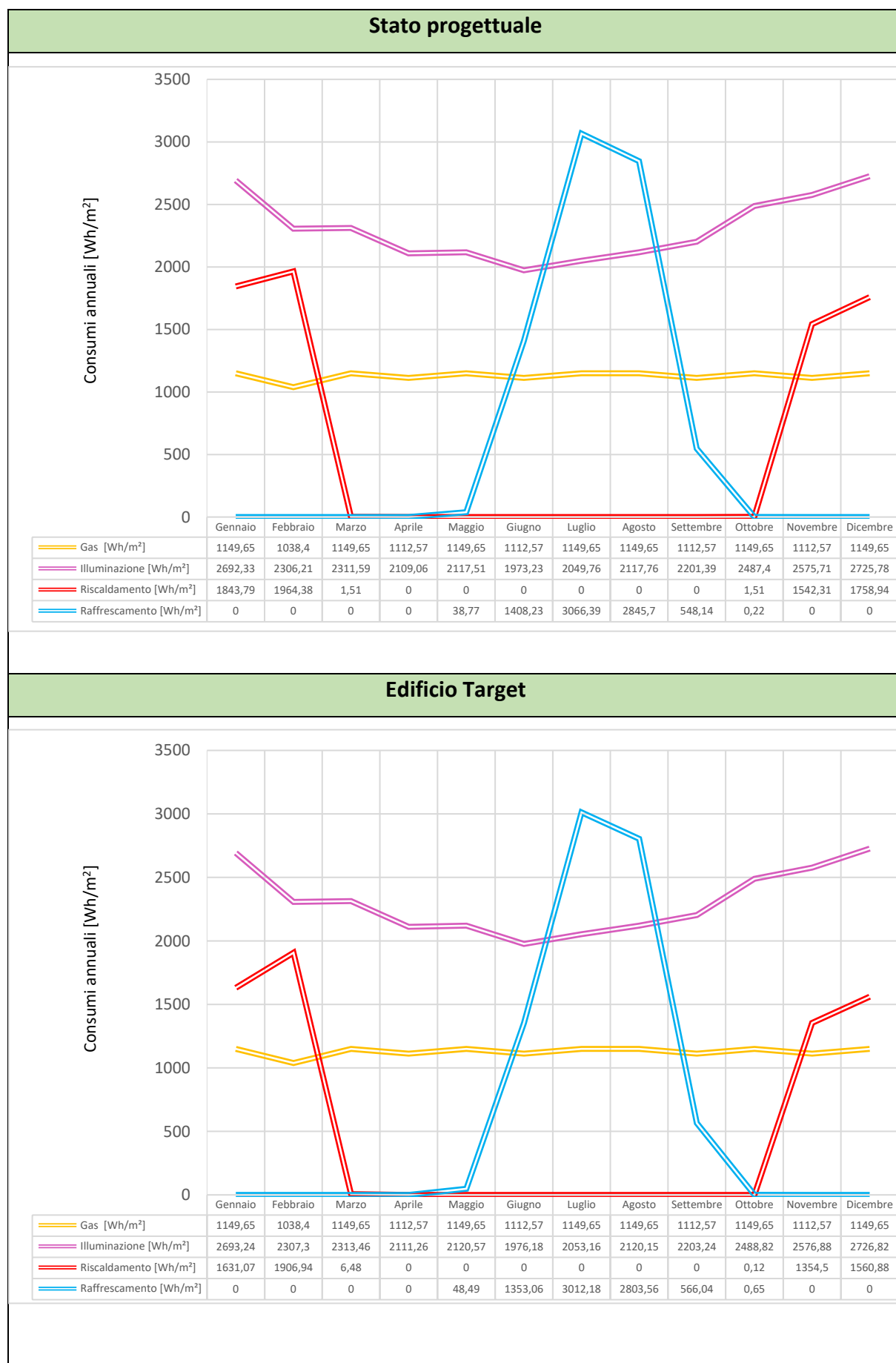
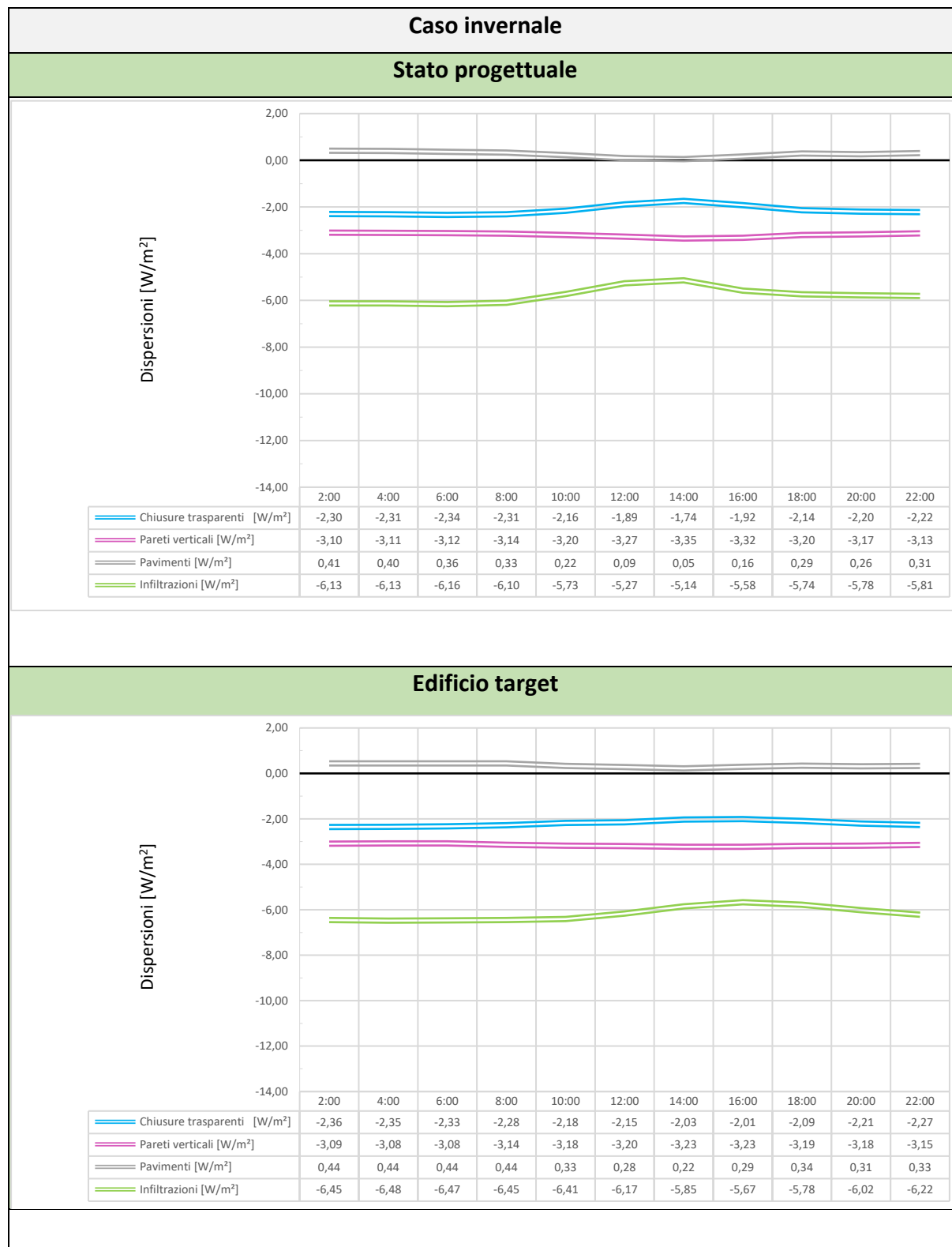


Tabella 6.2.1.2 Design Builder, Consumi separati – confronto progetto-edificio di riferimento

## 6.2.2 Comportamento pareti, solai e vetrate

Per verificare l'efficacia dell'isolamento termico dei componenti opachi dell'edificio di progetto e delle chiusure trasparenti adottate, è stata eseguita una simulazione il 21 gennaio per il caso invernale e una il 21 luglio per quello estivo. In questo modo è possibile confrontare il comportamento dei componenti opachi e vetrati di progetto con quelli imposti dal decreto.



**Tabella 6.2.1.3 Design Builder, Bilancio termico invernale – confronto progetto-edificio di riferimento**

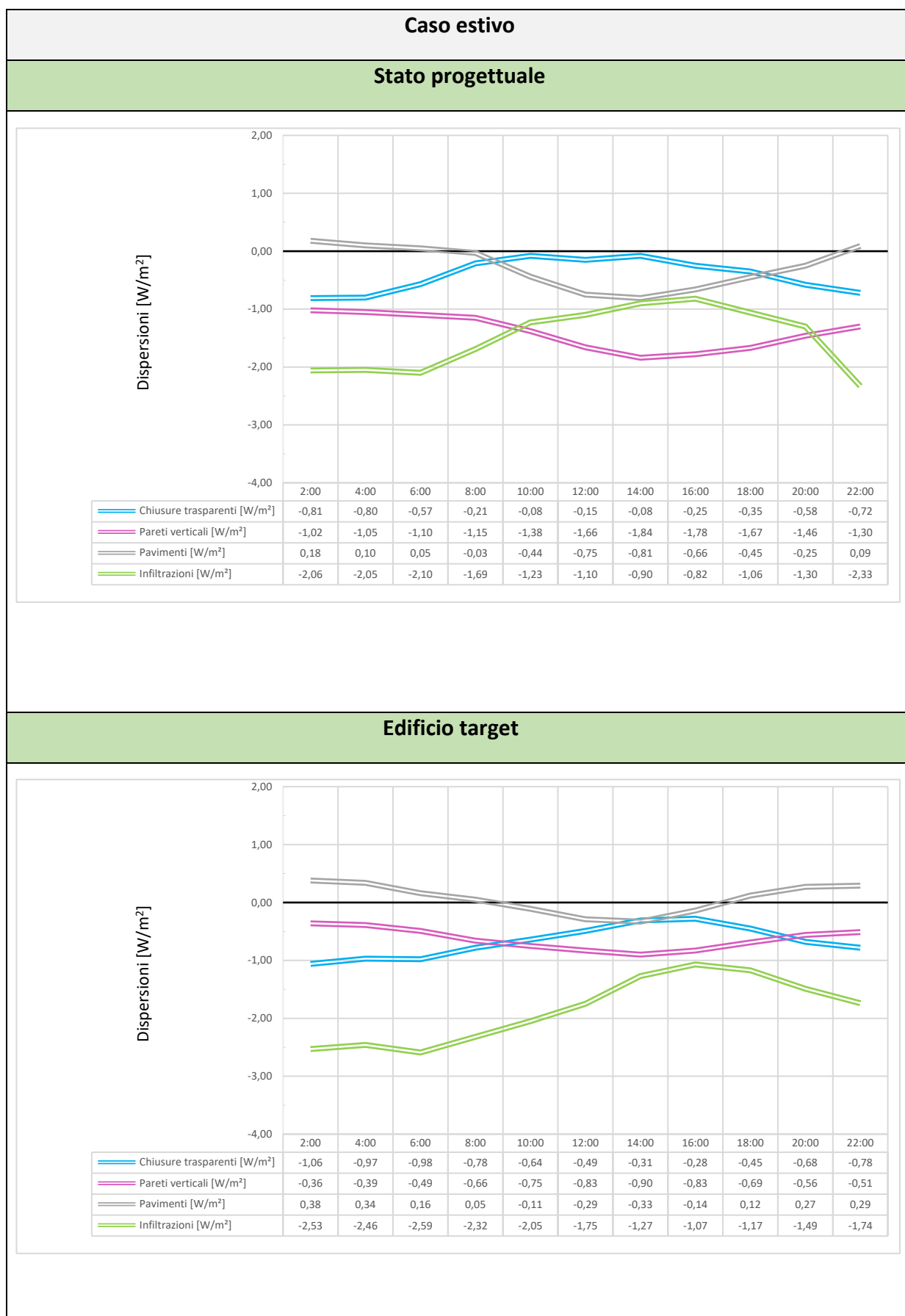


Tabella 6.2.1.4 Design Builder, Bilancio termico estivo – confronto progetto-edificio di riferimento

Osservando i primi due grafici riportati nella tabella 6.2.1.3, relativi alla situazione invernale del 21 gennaio, si può notare che:

- l'andamento delle dispersioni degli elementi vetrati (in azzurro) dell'edificio di riferimento è più omogeneo rispetto all'edificio dello stato progettuale. Tuttavia si può constatare che nell'intera giornata la sommatoria delle dispersioni delle vetrate dell'edificio di progetto risulta essere inferiore del 3%; questo risultato è vantaggioso nella stagione invernale in quanto riduce il fabbisogno di energia per il riscaldamento.
- Per quanto concerne le dispersione attraverso le pareti esterne (in viola), anche in questo caso l'edificio target presenta un andamento più lineare. In particolare, l'edificio di progetto disperde maggiormente attraverso gli elementi opachi verticali nelle ore pomeridiane (+50%); questo risultato va a discapito del sistema di riscaldamento.
- Analizzando l'andamento degli elementi opachi orizzontali (in grigio) si può osservare che l'edificio di riferimento presenta dei solai con maggior capacità di accumulo, in quanto rilasciano un maggior carico interno. Si tratta dei contributi di natura radiativa, i quali intervengono sul bilancio di energia in modo ritardato e parziale. Dal confronto si evince che tale caratteristica permette all'edificio target di ottenere una diminuzione delle dispersioni durante l'intera giornata pari al 25%.
- Infine, per quanto riguarda le perdite di calore dovute ai flussi entalpici connessi alle portate di aria di infiltrazione (in verde), si può notare che nell'edificio di progetto si hanno minori dispersioni. Nel dettaglio, si ha una differenza del 9,4%. Tale risultato è a favore dell'impianto di riscaldamento, in quanto diminuisce il carico termico su di esso.

Si passa successivamente all'analisi della tabella 6.2.1.4, nella quale si possono osservare le due simulazioni orarie effettuate il 21 luglio. Dai grafici riportati si può osservare che:

- I serramenti scelti da progetto presentano caratteristiche superiori rispetto a quelle imposte dal Decreto per l'edificio target. Osservando gli apporti interni dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati, infatti, si nota una differenza giornaliera complessiva pari al 38%.
- Osservando l'andamento delle pareti (in viola), si può notare che nel caso dell'edificio di riferimento esso risulta essere più vicino all'asse dello zero, per cui avviene minor scambio termico tra l'interno degli elementi e l'ambiente interno.
- Tra i due casi si ha una differenza sull'andamento delle dispersioni degli elementi opachi orizzontali (in grigio). Si può notare, infatti, che l'edificio di riferimento presenta solai caratterizzati da un'inerzia termica maggiore.
- Analizzando i flussi connessi con le portate di aria di infiltrazione (in verde), infine, si può constatare che l'edificio di progetto presenta una diminuzione complessiva giornaliera pari al 18%.

### 6.2.3 Apporti interni

Per confrontare l'andamento dei flussi termici entranti ed uscenti dall'involucro edilizio di progetto e da quello di riferimento, si riporta in seguito la tabella con i grafici degli apporti interni e solari, i quali sono stati realizzati mediante la simulazione annuale su base mensile.



**Tabella 6.2.3.1 Design Builder, Apporti interni – confronto progetto-edificio di riferimento**



Osservando gli andamenti degli apporti interni riportati nei grafici della tabella di confronto 6.2.3.1 si può notare:

- Gli andamenti dei consumi sono espressi in  $\text{Wh/m}^2$ ; questo perché è sono state impostate le simulazioni in funzione alle superfici realmente occupate;
- Il comportamento dei consumi per il riscaldamento (in rosso) e per il raffrescamento (in blu) giocano un ruolo fondamentale: nell'edificio di progetto il consumo di picco dei relativi valori sono rispettivamente  $1'669,72 \text{ Wh/m}^2$  e  $3'809,42 \text{ Wh/m}^2$ , mentre per l'edificio di riferimento  $1'620,90 \text{ Wh/m}^2$  e  $3'711,89 \text{ Wh/m}^2$ . In termini percentuali i valori dei due casi oggetto di confronto si differenziano del 2,9% per quanto riguarda il consumo per il riscaldamento e del 2,6% per il raffrescamento estivo. Le scelte progettuali in fase preliminare, pertanto, risultano essere efficienti.
- Gli apporti solari entranti attraverso le superfici trasparenti (in giallo) risultano avere lo stesso andamento mensile durante l'intero anno. Nello stato progettuale, però, la sommatoria complessiva annuale risulta essere pari a  $14'553,92 \text{ Wh/m}^2$  e nell'edificio target pari a  $14'969,19 \text{ Wh/m}^2$ . Questo delta positivo fra gli apporti solari entranti risulta essere favorevole per l'edificio di progetto nel periodo invernale in quanto tende a diminuire il carico sull'impianto. Nel caso estivo, però, tali contributi rappresentano ulteriori addendi positivi del bilancio energetico e quindi gravano sul carico termico.

#### 6.2.4 Considerazioni finali

Dal primo confronto emerge che, grazie alle scelte progettuali adottate in fase preliminare, si ottiene un edificio con un comportamento simile a quello di riferimento. La differenza del fabbisogno di riscaldamento fra l'edificio di progetto e quello di riferimento, infatti, risulta essere pari all'8,5%, mentre per quanto riguarda il fabbisogno di raffrescamento la differenza è dell'1,6%.

Confrontando il comportamento di ogni elemento, si può osservare che, per quanto riguarda le pareti esterne dell'edificio di progetto, nel caso invernale si hanno maggiori dispersioni nelle ore pomeridiane; nel caso estivo, invece, la radiazione solare incidente sulla parte esterna di tali superfici, gravano sul carico termico il 50% in più.

Per quanto concerne gli elementi vetrati, invece, i serramenti in legno dotati di doppio vetro e vetrocamera isolante, risultano essere davvero performanti. Durante la giornata del 21 luglio, infatti, essi garantiscono il 38% degli apporti solari in meno rispetto alle chiusure vetrate impostate in base alla normativa.

Analizzando l'andamento degli elementi opachi orizzontali, si nota che i solai dell'edificio di riferimento presentano una maggior capacità termica, riducendo così il carico sull'impianto di riscaldamento.

Osservando i flussi connessi con le portate di aria di infiltrazione, infine, gli andamenti delle portate è simile, ma l'edificio di riferimento risulta essere più permeabile. In particolare, nel caso invernale si ha una differenza del 6,5%, mentre in quello estivo del 18.6%

### 6.3 Calcolo della prestazione energetica

Una volta terminate la modellazione degli edifici dello stato attuale, progettuale e di riferimento è stata effettuata una simulazione annuale con intervalli mensili dei relativi consumi di energia fornita ai vari sottosistemi. In altre parole, sono stati monitorati i consumi per il riscaldamento, raffrescamento, per i ventilatori, per le pompe del sistema, per la preparazione dei cibi e per l'illuminazione interna.

Tramite le simulazioni dinamiche è stato possibile determinare la prestazione energetica di ogni singolo caso di studio, in base alla quantità di energia necessaria annualmente per soddisfare le esigenze legate ad un utilizzo standard dell'edificio in questione. Tale energia corrisponde al fabbisogno annuale globale di energia primaria.

La prestazione energetica degli edifici è determinata in conformità alla normativa tecnica UNI e CTI, le quali recepiscono le norme predisposte dal CEN a supporto della direttiva 2010/31 dell'Unione Europea.

Al fine di confrontare le prestazioni energetiche dei tre casi in esame, è stato effettuato il calcolo dell'energia primaria non rinnovabile utilizzando i fattori di conversione  $f_{p,nren}$  riportati nella tabella 1 della lettera h) del Decreto 26 giugno 2015.

Di seguito viene riportata la tabella 6.3.1 relativa al calcolo dell'energia primaria per l'edificio allo stato progettuale, stato attuale e di riferimento.

**Tabella 6.3.1 – Calcolo del fabbisogno annuale di energia primaria, edificio stato attuale**

| Impiego finale                       | Fonte energetica | Fattore di conversione<br>[-] | Energia fornita<br>[kWh] | Energia primaria<br>[kWh] |
|--------------------------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Preparazione cibi                    | gas              | 1,05                          | 20.693,18                | 21.727,84                 |
| Illuminazione                        | elettricità      | 2,42                          | 39.359,75                | 95.250,60                 |
| Ventilatori                          | elettricità      | 2,42                          | -                        | -                         |
| Pompe inverter                       | elettricità      | 2,4                           | -                        | -                         |
| Riscaldamento                        | gasolio          | 1,07                          | 85.339,63                | 91.313,40                 |
| Raffrescamento                       | elettricità      | 2,42                          | -                        | -                         |
| ACS                                  | gasolio          | 1,07                          | 37.215,66                | 39.820,76                 |
| <b>Energia primaria Totale [kWh]</b> |                  |                               |                          | <b>248.112,60</b>         |

**Tabella 6.3.2 – Calcolo del fabbisogno annuale di energia primaria, edificio di progetto**

| <b>Impiego finale</b> | <b>Fonte energetica</b> | <b>Fattore di conversione</b><br>[-] | <b>Energia fornita</b><br>[kWh] | <b>Energia primaria</b><br>[kWh] |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Preparazione cibi     | gas                     | 1,05                                 | 20.872,88                       | 21.916,53                        |
| Illuminazione         | elettricità             | 2,42                                 | 42.663,66                       | 103.246,05                       |
| Ventilatori           | elettricità             | 2,42                                 | 593,45                          | 1.436,16                         |
| Pompe inverter        | elettricità             | 2,42                                 | 7.983,98                        | 19.321,24                        |
| Riscaldamento         | gas                     | 1,05                                 | 8.252,77                        | 8.665,41                         |
| Raffrescamento        | elettricità             | 2,42                                 | 12.193,30                       | 29.507,79                        |
| ACS                   | Gas                     | 1,05                                 | 37.205,04                       | 39.065,29                        |

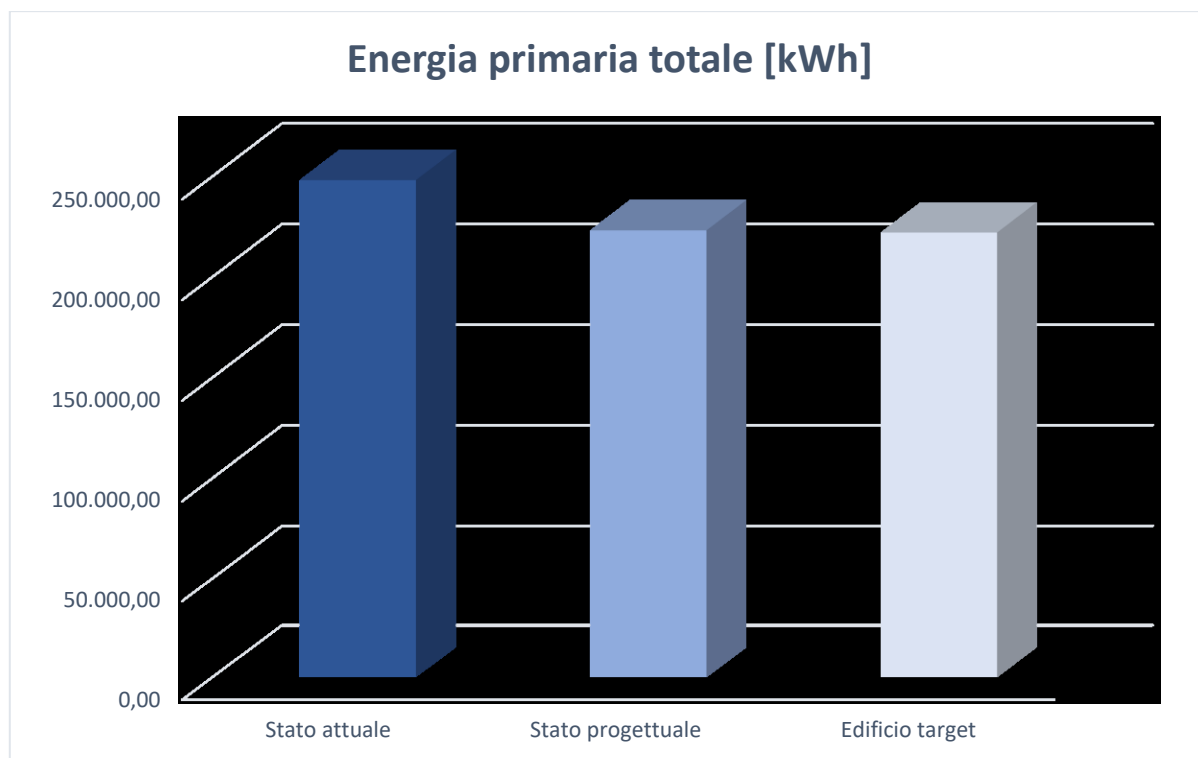
|                                      |                   |
|--------------------------------------|-------------------|
| <i>Energia primaria Totale [kWh]</i> | <i>223.158,46</i> |
|--------------------------------------|-------------------|

**Tabella 6.3.3 – Calcolo del fabbisogno annuale di energia primaria, edificio di riferimento**

| <b>Impiego finale</b> | <b>Fonte energetica</b> | <b>Fattore di conversione</b><br>[-] | <b>Energia fornita</b><br>[kWh] | <b>Energia primaria</b><br>[kWh] |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Preparazione cibi     | gas                     | 1,05                                 | 20.872,88                       | 21.916,53                        |
| Illuminazione         | elettricità             | 2,42                                 | 42.699,65                       | 103.333,14                       |
| Ventilatori           | elettricità             | 2,42                                 | 594,72                          | 1.439,22                         |
| Pompe inverter        | elettricità             | 2,42                                 | 7.983,98                        | 19.321,24                        |
| Riscaldamento         | gas                     | 1,05                                 | 7.554,43                        | 7.932,15                         |
| Raffrescamento        | elettricità             | 2,42                                 | 12.002,90                       | 29.047,01                        |
| ACS                   | Gas                     | 1,05                                 | 37.205,04                       | 39.065,29                        |

|                                      |                   |
|--------------------------------------|-------------------|
| <i>Energia primaria Totale [kWh]</i> | <i>222.054,57</i> |
|--------------------------------------|-------------------|

Per avere un confronto più immediato, si riportano i fabbisogni annuali globali di energia primaria di ciascun caso, mediante il diagramma 6.3.4.:



**Grafico 6.3.4. Fabbisogni annuali globali energia primaria – confronto stato attuale-progettuale-edificio di riferimento**

Dalle simulazioni dinamiche annuali dei consumi e dalla successiva trasformazione dell'energia fornita all'energia primaria tramite i fattori di conversione, si evince che in seguito ai lavori previsti di riqualificazione energetica ed impiantistica, il fabbisogno annuale globale passa da un valore pari a 248.112,60 kWh ad uno pari a 223.158,46 kWh. Questo si traduce in un risparmio finale pari all'10,1% in termini di fabbisogno di energia primaria.

Tra l'edificio di progetto e l'edificio di riferimento, invece, la differenza tra i fabbisogni annuali globali è minima. È stato ricavato per l'edificio di target, infatti, un fabbisogno pari a 222.054,57 kWh, il quale si discosta da quello di progetto solo dell'1%.

Per maggior completezza di questa analisi, si ritiene opportuno soffermarsi un attimo sulla questione dell'energia rinnovabile. È bene sottolineare il fatto che durante la fase di modellazione dell'edificio di progetto non sono state considerate le fonti di energie rinnovabile previste. L'impianto solare termico costituito da quindici pannelli solari, infatti, non è stato inserito nel modello, pertanto il software non ha calcolato la quota parte di energia rinnovabile durante le simulazioni. In merito a tale precisazione, si può quindi affermare che nel caso reale si avrà un'ulteriore diminuzione del fabbisogno globale di energia primaria, cioè un risparmio ulteriore sui costi di gestione dell'edificio.

## 6.4 Calcolo dei costi di energia

Nel presente paragrafo vengono determinati i costi annuali per le varie fonti energetiche per quanto riguarda lo stato attuale e l'edificio in seguito ai lavori di riqualificazione energetica. Come nel paragrafo precedente, anche in questo caso è stata effettuata una simulazione annuale con intervalli mensili dei relativi consumi di energia fornita ai vari sottosistemi.

Tramite la simulazione dinamica dell'edificio dello stato attuale e di progetto, è stato possibile monitorare i consumi per il riscaldamento, raffrescamento, per i ventilatori, per le pompe del sistema, per la preparazione dei cibi e per l'illuminazione interna. Successivamente i seguenti valori sono stati moltiplicati per i costi delle relative fonti energetiche.

**Tabella 6.4.1 – Calcolo del costo annuale di energia, edificio stato attuale**

| Impiego finale    | Fonte energetica | €/kwh | Consumi [kWh] | Costo     |
|-------------------|------------------|-------|---------------|-----------|
| Preparazione cibi | gas              | 0,09  | 20.693,18     | 1.862,39  |
| Illuminazione     | elettricità      | 0,23  | 39.359,75     | 9.052,74  |
| Ventilatori       | elettricità      | 0,23  | -             | -         |
| Pompe inverter    | elettricità      | 0,23  | -             | -         |
| Riscaldamento     | gasolio          | 0,18  | 85.339,63     | 15.361,13 |
| Raffrescamento    | elettricità      | 0,23  | -             | -         |
| ACS               | gasolio          | 0,18  | 37.215,66     | 6.698,82  |

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| <i>Costo totale [€]</i> | <i>32.975,08</i> |
|-------------------------|------------------|

**Tabella 6.4.2 – Calcolo del costo annuale di energia, edificio di progetto**

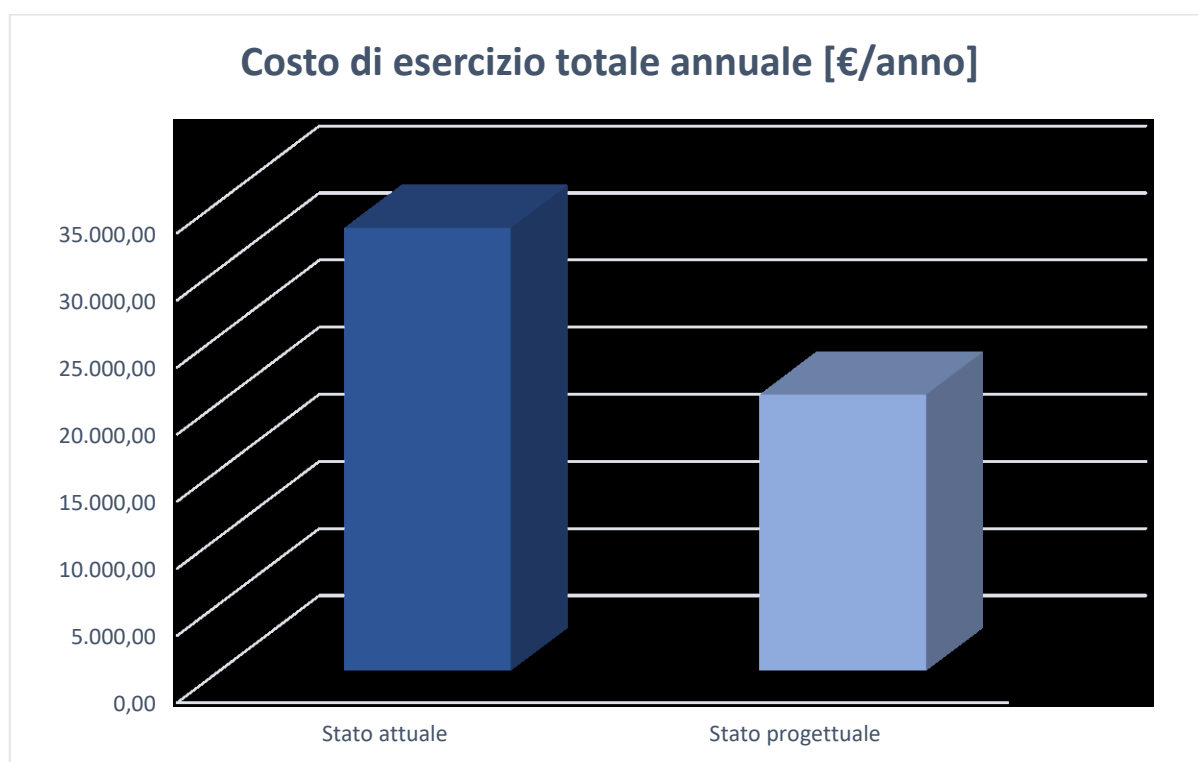
| Impiego finale    | Fonte energetica | €/kwh | Consumi [kWh] | Costo [€] |
|-------------------|------------------|-------|---------------|-----------|
| Preparazione cibi | gas              | 0,09  | 20.872,88     | 1.878,56  |
| Illuminazione     | elettricità      | 0,23  | 42.663,66     | 9.812,64  |
| Ventilatori       | elettricità      | 0,23  | 593,45        | 136,49    |
| Pompe inverter    | elettricità      | 0,23  | 7.983,98      | 1.836,31  |
| Riscaldamento     | gas              | 0,09  | 8.252,77      | 742,74    |
| Raffrescamento    | elettricità      | 0,23  | 12.193,30     | 2.804,46  |
| ACS               | gas              | 0,09  | 37.205,04     | 3.348,45  |

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| <i>Costo totale [€]</i> | <i>20.559,65</i> |
|-------------------------|------------------|

I valori assunti per le varie fonti energetiche sono stati ricavati nel seguente modo:

- Gas: da un'indagine di mercato è stato constatato che il costo di gas metano domestico si aggira sull'ordine degli 0,70-0,90 €/m<sup>3</sup>. Sapendo che ogni metro cubo di gas metano fornisce 9,6 kWh, è stata considerata una caldaia tradizionale con un'efficienza pari all'85% per considerare il caso più sfavorevole. In questo caso un metro cubo di gas fornisce 8kWh termici. Per cui il costo di un kWh termico è stato ricavato dal rapporto fra il prezzo al m<sup>3</sup> del gas ed il numero di kWh termici con un m<sup>3</sup> di metano, ottenendo un valore pari a 0,09 €/ kWh;
- Gasolio: il ragionamento è analogo al precedente. Sapendo che il costo del gasolio per il riscaldamento si aggira sugli 1,50 €/l e che ogni litro di gasolio fornisce circa 10 kWh, considerando sempre una caldaia tradizionale con un'efficienza dell'85%, si ha che un litro di gasolio fornisce 8,5 kWh termici. Dividendo 1,50 €/l per 8,5 kWh/l si ottiene il costo per ogni kWh pari a 0,18 €/ kWh;
- Elettricità: il costo utilizzato per l'energia elettrica è stato ricavato mediante un contratto di fornitura dell'Enel.

Per avere un confronto più immediato, si riportano i costi annuali per la fornitura di energia per confrontare la spesa totale tra prima e dopo gli interventi:



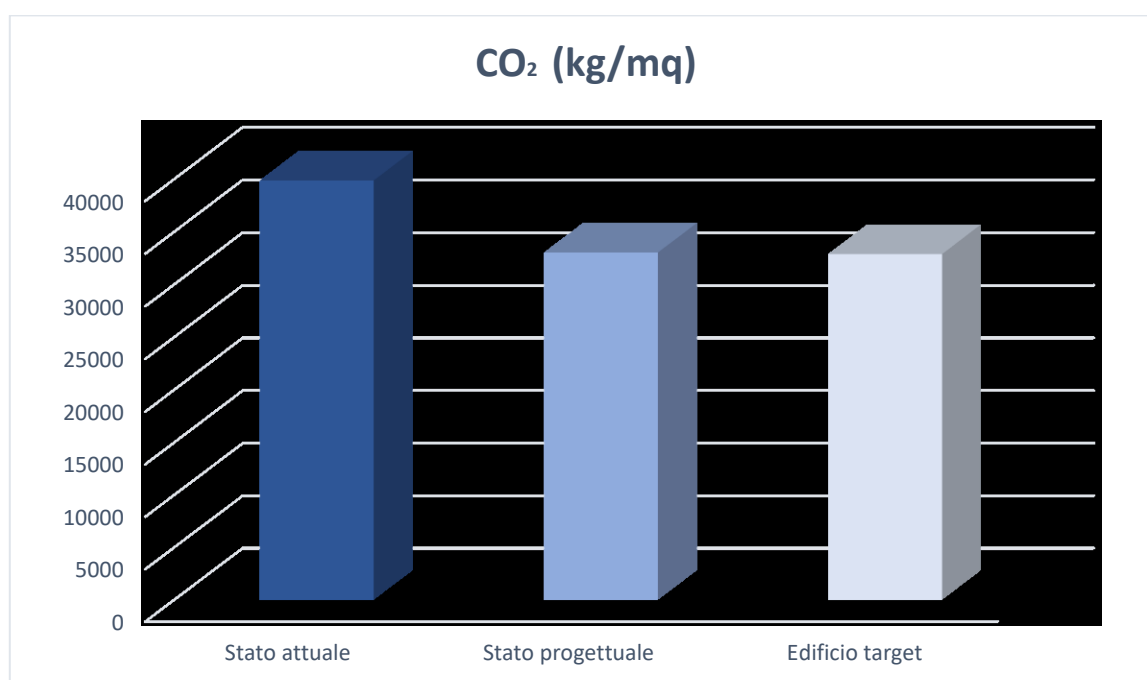
**Grafico 6.4.4. Costo annuale di energia – confronto stato attuale-progettuale**

Dalle simulazioni dinamiche annuali dei consumi e dal successivo calcolo del costo per la fornitura dell'energia, si osserva che in seguito ai lavori previsti di riqualificazione energetica ed impiantistica, si ottiene un risparmio economico del 37,65%. Il costo totale annuo di esercizio, infatti, passa da un valore massimo pari a 32.975,08 €/anno a 20.559,65 €/anno, con un risparmio di 12.415,43 €/anno.

Anche in questo caso è doveroso ricordarsi che durante la fase di modellazione dell'edificio di progetto non sono state considerate le fonti di energie rinnovabile previste. L'impianto solare termico costituito da quindici pannelli solari, infatti, non è stato inserito nel modello, pertanto il software non ha calcolato la quota parte di energia rinnovabile durante le simulazioni. In merito a tale precisazione, si può quindi affermare che nel caso reale si avrà un ulteriore risparmio sui costi di gestione dell'edificio.

## 6.5 Valutazione della sostenibilità dell'intervento edilizio

In questo paragrafo si pone l'attenzione sulla sostenibilità edilizia dell'intervento oggetto di studio. I cambiamenti climatici e il problema dell'inquinamento ambientale rendono necessario un cambio di mentalità per favorire l'adozione di soluzioni che garantiscono uno sviluppo sostenibile. Dato che il settore dell'edilizia produce il 40% delle emissioni di CO<sub>2</sub> a livello Europeo, si è ritenuto opportuno riservare un paragrafo a parte relativo al miglioramento energetico dell'edificio oggetto di studio. A tale proposito, mediante DesignBuilder, sono state effettuate le simulazioni annuali relative al consumo di CO<sub>2</sub> dello stato attuale, progettuale e dell'edificio di riferimento e sono state messe a confronto. Si riporta tale analisi nel diagramma 6.5.1:



**Grafico 6.5.1. Produzione CO<sub>2</sub> annuale – confronto stato attuale-progettuale-edificio di riferimento**

Come si evince dal grafico 6.5.1., grazie ai lavori di riqualificazione energetica dell'involucro presso l'edificio "Corte Riflessa", si ha una riduzione della produzione di anidride carbonica pari al 17,2%. Si passa infatti da un consumo di CO<sub>2</sub> pari a 39'837,41 kg/m<sup>2</sup> annui dello stato attuale ad un valore corrispondente a 32'997,53 kg/m<sup>2</sup> annui dopo gli interventi previsti.

L'edificio di riferimento, invece, è caratterizzato da un consumo di CO<sub>2</sub> pari a 32'852,40 kg/m<sup>2</sup> annui, il quale si traduce ad una diminuzione dello 0,44% rispetto allo stato progettuale.

## Conclusioni

Al termine dell'intero elaborato svolto, si può constatare che l'obiettivo principale che si era prefissato, ovvero supportare la progettazione integrata tramite la simulazione energetica in regime dinamico, è stato raggiunto. Tramite il software, infatti, è stato possibile eseguire un corretto iter progettuale, caratterizzato da momenti di analisi e di confronto tra stato attuale e le opere che si intendono realizzare al fine di minimizzare il fabbisogno energetico. Tale approccio garantisce un metodo iterativo e interattivo tra l'involucro dell'edificio e gli impianti tecnologici. Il confronto tra l'edificio allo stato attuale e quello di progetto ha permesso di valutare dal punto di vista energetico gli interventi che sono stati pensati in fase preliminare, con la possibilità di tornare a monte per scegliere soluzioni alternative.

Tramite gli output del software, in seguito alla modellazione delle stratigrafie degli elementi opachi verticali e orizzontali e degli elementi trasparenti, è stato possibile studiare il comportamento dell'edificio dal punto di vista degli apporti interni, del confort, dei consumi e dell'emissione del gas serra. Le simulazioni dinamiche fornite dal software risultano essere un grande ausilio per la progettazione. Queste, infatti, permettono di individuare eventuali comportamenti anomali del sistema edificio-impianto, i quali se non vengono corretti in fase progettuale, potrebbero avere ripercussioni sull'utente finale.

Il confronto tra le diverse simulazioni dinamiche prodotte con il modello dell'edificio di progetto e con quello dell'edificio di riferimento settato con i valori imposti dal Decreto Interministeriale 26 giugno 2015, ha permesso di verificare l'efficienza delle tecnologie costruttive scelte in fase preliminare. Il confronto tra l'edificio allo stato attuale e l'edificio di progetto, invece, ha fatto emergere un risparmio di energia primaria globale pari al 10% e ad una riduzione della produzione di CO<sub>2</sub> del 17,2%.

La scelta di utilizzare Design Builder come interfaccia per il software di calcolo "EnergyPlus" è stata pratica ed efficace. Questo programma, infatti, ha permesso di adottare un metodo affidabile per lo studio del comportamento termoeconomico del sistema edificio-impianto. Le simulazioni dinamiche effettuate mediante il software, hanno portato risultati attendibili in termini di flussi termici scambiati attraverso le superfici dell'involucro, carichi termici endogeni, flussi connessi alle portate d'aria di ventilazione ed infiltrazione, radiazione solare attraverso le superfici trasparenti e di consumi. Questo metodo pertanto si dimostra idoneo non solo in ambito universitario, ma anche in ambiti professionali, come ad esempio per la verifica delle prescrizioni imposte per gli edifici di nuova costruzione, degli edifici sottoposti a ristrutturazioni importanti e in ottica futura, per lo studio degli edifici NZEB. Questo approccio, infine, potrebbe essere adottato anche nel campo della certificazione LEED.



In merito al programma di modellazione si ritiene opportuno riferire che la quantità di dati in ingresso e in uscita è molto elevata. Risulta quindi indispensabile un'ottima padronanza del software e una conoscenza approfondita dei fenomeni fisici che caratterizzano il sistema edificio-impianto. Nel caso in esame, non vi sono stati problemi nella modellazione dell'involucro edilizio, mentre, per quanto riguarda gli impianti, sono state adottate delle semplificazioni. Come indicato nel paragrafo 6.3, infatti, l'impianto solare termico non è stato modellato, pertanto la quantità di energia fornita mediante fonte di energia rinnovabile non è stata calcolata dal software. In ambito professionale, quindi, risultano indispensabili tecnici specializzati per gestire questi strumenti di calcolo.

Concludendo si può approvare che, dato il ruolo fondamentale che ricopre il settore dell'edilizia sulla qualità della vita degli esseri viventi e del contesto ambientale, in fase preliminare risulta opportuno seguire l'approccio appena esposto. Dall'elaborato svolto si osserva infatti che lo studio termoigrometrico in campo dinamico è uno strumento di ausilio alla progettazione integrata, in grado di monitorare il fabbisogno energetico dell'edificio, garantire un elevato confort interno, senza perdere di vista gli obiettivi di ridurre gli effetti irreversibili sull'ambiente e limitare i costi di manutenzione e di gestione relativi al ciclo di vita dell'edificio.

## Ringraziamenti

*Ringrazio l'Ing. Dirutigliano Domenico, per la disponibilità dimostrata e per la conoscenza messa a mia disposizione per avvicinarmi al mondo della simulazione dinamica.*

*Ringrazio l'ing. Francesco Calicchio e a tutti i componenti della Lictis per la disponibilità, la competenza ed il supporto fornito. Uno straordinario team con il quale sto vivendo la miglior esperienza lavorativa, dandomi la possibilità di crescere sia dal punto di vista professionale che dal lato umano.*

*Un ringraziamento allo staff del "Boja Fauss", ed in particolare a Roberto, il quale mi ha dato supporto fin dal primo giorno in cui sono arrivato a Torino e ha sempre dimostrato stima nei miei confronti.*

*Desidero ringraziare i miei colleghi di corso Giuseppe, Andrea, Fabio, Francesca, Virginia, Martina, Marco ed Arthur, con i quali ho condiviso bellissime esperienze nell'arco di questi anni e che porterò sempre con me.*

*Un ringraziamento speciale ai miei genitori Monica e Silvano, a mia sorella Simona ed alle mie nonne Lilliana e Clara. Senza il loro supporto ed i loro sacrifici non sarei mai arrivato a raggiungere questo importante traguardo.*

*Ai miei amici da una vita Fabio, Andrea, Lorenzo, Davide, Ettore, Luca, Mattia e Salvatore, i quali mi hanno sempre incoraggiato per raggiungere i miei obiettivi.*

*A Linda, che mi è stata sempre accanto, dandomi tutto il suo sostegno ed incoraggiamento per portare a termine questo lavoro.*

*Al mio migliore amico Andrea, il quale mi ha sempre sostenuto e trasmesso la forza per andare avanti nel mio percorso universitario.*

*Infine, ad Enea, il nuovo arrivato nella famiglia Galassi, che ci ha portato tanta felicità e gioia nel cuore.*

*A tutti voi dedico il mio lavoro.*

## Bibliografia

1. AA.VV., EnergyPlus version 8.5 Documentation, Engineering Reference, California, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016
2. AA.VV., EnergyPlus version 8.6 Documentation, Input Output Reference, California, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016
3. Nicola Rossi, Manuale della termotecnica, HOEPLI, 2009
4. Aldo Orioli, "Comportamento termico dell'elemento di involucro edilizio in regime termico non stazionario: parametri caratterizzanti, metodi di modellazione numerica, riferimenti normativi nazionali ed internazionali," DREAM Università di Palermo. Dipartimento di ricerche energetiche ed ambientali, 2008
5. Joseph A. Clarke, Energy simulation in building design, II ed.: Butterworth-Heinemann, 2007.
6. Arasteh, D., J.C. Kohler, B. Griffith, Modeling Windows in EnergyPlus with Simple Performance Indices, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009
7. Guida AiCARR, Introduzione alla simulazione termo-energetica dinamica degli edifici, Marco Filippi and Enrico Fabrizio, Eds.: Editoriale Delfino, 2012.
8. J.D. Spitler, "Load calculation applications manual," Ashrae, Atlanta, 2009.

## Normativa tecnica

9. UNI/TS 11300-1: 2014 "Prestazione energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva ed invernale"
10. UNI/TS 11300-2: 2014 "Prestazione energetiche degli edifici – Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali"
11. UNI/TS 11300-3: 2010 "Prestazione energetiche degli edifici – Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva"

12. UNI/TS 11300-4: 2012 "Prestazione energetiche degli edifici – Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.
13. DECRETO 26 giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici"
14. UNI 10339: 1995 "Impianti aeraulici a fini di benessere – Generalità, classificazione e requisiti – regole per la richiesta d’offerta, l’offerta, l’ordine e la fornitura"
15. Aggiornamento del Piano regionale per il risanamento e la tutela della qualità dell’aria stralcio di piano per il riscaldamento ambientale e il condizionamento e disposizioni attuative della legge regionale 28 maggio 2007 n. 13 (disposizioni in materia di rendimento energetico nell’edilizia) articolo 21, lettere a), b) e q)
16. UNI 10349: 2016 Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici.
17. UNI EN ISO 13786 Prestazione termica dei componenti per l'edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo, 2008
18. UNI 10375. Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti, 2011

## Webgrafia

19. <http://www.designbuilderitalia.it/>
20. <https://www.designbuilder.co.uk/>
21. <https://energyplus.net/>
22. <http://www.mise.gov.it/>
23. <http://www.energiaenergetica.enea.it>
24. <http://www.bosettiegatti.eu>
25. <http://www.edilportal.com>
26. <http://wwwt.agenziaentrate.gov.it>
27. <http://www.regione.piemonte.it>