

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale in ingegneria energetica e nucleare

Tesi di laurea magistrale

**Sviluppo di un algoritmo di calcolo per la stima speditiva del
fabbisogno energetico di edifici residenziali**



Relatore: Prof.ssa Ilaria Ballarini
Correlatore: Prof. Vincenzo Corrado

Candidato: Marco Compierchio

Ottobre 2019

INDICE

Introduzione	3
1. Modelli matematici per la stima del fabbisogno energetico degli edifici	5
1.1 Fondamenti teorici.....	5
1.2 Modello semplificato per una valutazione su larga scala	8
1.3 Esempi applicativi	8
2. Determinazione dell’algoritmo di calcolo	9
2.1 Dal metodo semplificato all’equazione lineare	9
2.2 Dall’equazione lineare all’algoritmo di calcolo.....	13
2.3 Definizione delle variabili.....	14
3. Sviluppo del modello	22
3.1 Strumento di simulazione dinamica dettagliata	23
4. Analisi del campione di calcolo	26
4.1 Descrizione dell’edificio-tipo	26
4.2 Varianti.....	35
5. Risultati e implementazione	50
5.1 Risultati dell’analisi statistica	50
5.2 Determinazione di fattori correttivi.....	54
5.3 Implementazione dell’algoritmo	55
6. Validazione del modello	66
6.1 Test di validazione 1.....	66
6.2 Test di validazione 2.....	68
7. Conclusioni	70
Bibliografia	71
Appendice A	72
Appendice B	87

Introduzione

A seguito di una sempre maggiore consapevolezza delle condizioni climatiche globali, sono state intraprese politiche volte alla riduzione delle emissioni inquinanti. Un esempio è il cosiddetto “pacchetto 20-20-20” stipulato dai Paesi membri dell’Unione Europea; esso consiste in una serie di norme vincolanti per garantire il raggiungimento di tre obiettivi comuni in materia di clima ed energia entro il 2020, tra i quali la riduzione del consumo di energia.

In Italia nel 2017 circa il 38% della domanda di energia è stato impiegato per l’uso civile, ossia per il terziario e il residenziale [1]. Essendo un settore molto energivoro, risulta evidente che azioni volte al miglioramento dell’efficienza possono contribuire in maniera significativa a quel risparmio energetico necessario e prescritto nelle normative nazionali e sovranazionali. Per quanto riguarda il campo residenziale, negli ultimi anni sono stati effettuati interventi di riqualificazione su edifici già presenti da tempo sul territorio. Nel nostro Paese infatti, la maggior parte delle abitazioni è stata costruita nel secondo dopoguerra o addirittura prima, per cui il parco edilizio italiano è costituito da immobili generalmente poco isolati e caratterizzati da elevati consumi energetici. Quando si vogliono realizzare degli interventi di riqualificazione però, bisogna ovviamente tener conto anche del fattore economico: se i risparmi previsti non si ritengono sufficienti ad ammortizzare l’investimento iniziale, il progetto di intervento non viene attuato.

Il lavoro di tesi si colloca all’interno di un’attività di ricerca svolta presso il Dipartimento Energia, in collaborazione con il Dipartimento Architettura e Design del Politecnico di Torino, in un più ampio studio condotto per conto della società Iren. L’obiettivo è consistito nello sviluppo di un tool per la stima speditiva dei consumi e dei costi di interventi di riqualificazione energetica negli edifici condominiali. Si tratta pertanto di uno strumento di analisi costi-benefici, che offre ai tecnici commerciali di Iren la possibilità di conoscere in maniera semplice e immediata se può essere conveniente o meno proporre una certa misura di efficientamento su un determinato condominio, dovendo inserire nel tool solo informazioni facilmente reperibili riguardanti la geometria e le tecniche costruttive e di impianto. Ovviamente il modello non ha la pretesa di sostituirsi ad un audit energetico o economico, a causa delle semplificazioni e ipotesi presenti: per esempio non tiene conto degli effettivi comportamenti degli occupanti in quanto questi sono standardizzati. Devono

quindi essere avviati in un secondo momento studi più approfonditi, nel caso in cui si decida di intervenire. Le tipologie di efficientamento prese in considerazione in questo studio riguardano l'involucro, ossia l'isolamento delle pareti, del solaio inferiore, di quello di copertura, e i serramenti; non vengono considerati interventi sugli impianti di produzione dell'energia.

Il lavoro di tesi in particolare si concentra sulla determinazione dell'algoritmo di calcolo, di tipo predittivo, che è stato sviluppato per valutare i consumi energetici per la climatizzazione invernale prima e dopo i possibili interventi; non viene quindi trattata la tematica economica.

Nel capitolo 1 vengono classificati e descritti i modelli matematici utilizzati oggi per il calcolo della prestazione energetica, e vengono citati alcuni esempi applicativi di modelli semplificati di calcolo, applicati su larga scala, presenti in letteratura scientifica. Nel secondo capitolo invece si illustrano i fondamenti teorici che sono alla base della costruzione dell'equazione di calcolo e si definiscono le variabili di input e output che la caratterizzano. Nel capitolo successivo viene spiegata la procedura che ha reso possibile la creazione del modello semplificato di tipo predittivo e viene illustrato il funzionamento principale del software per la simulazione energetica, utilizzato per avere dei dati di consumo da cui poter derivare i coefficienti dell'equazione. Nel quarto capitolo, viene presentato il campione di edifici su cui sono state condotte le simulazioni necessarie: dapprima viene mostrato l'edificio-tipo nelle sue caratteristiche costruttive e nella sua realizzazione all'interno del software, poi vengono sinteticamente descritti gli altri edifici, varianti di quello di partenza. Nel capitolo 5 si mostrano i risultati dell'analisi statistica condotta sul campione di edifici e i coefficienti così trovati. Vengono illustrate le procedure per la determinazione di fattori correttivi e come l'algoritmo viene implementato, mostrando come le scelte che l'utilizzatore finale del tool compie si traducano nelle variabili dell'equazione di calcolo. Il capitolo 6 è dedicato all'attività di validazione, ossia al test su due edifici reali, per verificare la bontà del modello. Infine, nell'ultimo capitolo sono contenute le conclusioni.

1. Modelli matematici per la stima del fabbisogno energetico degli edifici

1.1. Fondamenti teorici

Nel corso degli anni sono stati sviluppati vari metodi di calcolo per stimare la domanda di energia all'interno degli edifici. Si tratta di modelli matematici che descrivono il comportamento di un sistema. Essi sono costituiti essenzialmente da tre elementi: [2]

- le variabili di input (chiamate anche variabili di regressione o forzanti), che agiscono sul sistema;
- la struttura del sistema e i suoi parametri e proprietà, che danno una descrizione fisica del sistema;
- le variabili di output (chiamate anche variabili di risposta o dipendenti), che descrivono la reazione del sistema sotto l'azione delle variabili di input.

Questi modelli vengono utilizzati al fine di determinare il terzo componente quando gli altri due sono già noti e descritti. Si possono quindi suddividere in due categorie a seconda dell'obiettivo dello studio che si vuole compiere: i modelli "forward" (o "diretti") e i modelli "inversi".

I primi hanno lo scopo di predire le variabili di output di uno specifico modello con una struttura nota e parametri noti quando soggetti a specifiche variabili di input. Questi modelli sono diventati col tempo molto complessi, per assicurare una maggiore accuratezza: occorre avere una dettagliata conoscenza non solo dei fenomeni fisici che influenzano il comportamento del sistema ma anche di quanti e quali interazioni vi sono tra essi. Questo tipo di approccio è molto vantaggioso nei casi di calcoli di progetto, prima dell'effettiva costruzione dell'edificio o dell'impianto oggetto di analisi, poiché non occorre fare riferimento ad un sistema fisicamente presente.

I secondi invece hanno lo scopo di determinare la relazione matematica che lega le variabili di input e di output, entrambe note e misurate, oltre a stimare i parametri del sistema. Questi modelli sono molto utili quando il sistema oggetto di analisi è già presente, per cui è possibile avere già dati sulle effettive prestazioni del sistema per lo sviluppo del modello,

e sono solitamente più semplici e precisi dei precedenti. Al contrario, sono meno versatili nel caso in cui debbano essere utilizzati per diverse alternative operative o di design o misure di efficientamento.

I modelli diretti possono essere molto diversi tra loro, ma consistono tutti di una procedura comune, articolata in tre passaggi fondamentali:

- il calcolo del fabbisogno termico, ossia la quantità di energia termica che dev'essere fornita o sottratta all'ambiente per mantenere una condizione di comfort ed una temperatura prefissata;
- il calcolo del carico richiesto dai sottosistemi che veicolano l'energia dall'impianto principale verso l'ambiente, determinato a partire dal fabbisogno termico;
- il calcolo dell'energia richiesta dall'impianto che effettivamente converte il combustibile o l'energia elettrica in ingresso all'edificio in un vettore che consenta di riscaldare o raffreddare l'ambiente interno.

Per il calcolo del fabbisogno termico, a seconda del livello di complessità dei vari modelli possono essere presi in considerazione la temperatura esterna di bulbo umido, gli apporti solari, quelli interni, l'accumulo termico nelle pareti esterne e interne e gli effetti del vento, sia sul termine di coefficiente di scambio termico per conduzione che su quello relativo all'infiltrazione. I procedimenti più sofisticati oggi prevedono profili orari per le condizioni climatiche e quelle operazionali su un certo numero di giorni tipici della stagione o sulle 8760 ore annuali. Uno dei metodi maggiormente utilizzati per il calcolo, però, è il metodo semplificato, che assume il carico termico globale come somma dei carichi termici prodotti dalle differenti sollecitazioni esterne e interne all'ambiente, e che può essere scritto considerando solo i carichi sensibili, o anche quelli latenti. [3]

I modelli inversi possono essere classificati in tre diverse categorie: i modelli basati su un approccio empirico o "black-box", quelli che hanno un approccio di simulazione calibrata e i cosiddetti modelli "grey-box". I primi consistono in un modello di regressione semplice o con più variabili; esso correla la variabile di output, normalmente la quantità di energia fornita e misurata, con una serie di variabili di input, come le condizioni climatiche o quelle relative all'occupazione. Normalmente i coefficienti del modello sono tali da non avere un preciso significato fisico, ma sono spesso utilizzati a causa della loro relativa semplicità. I secondi fanno invece uso di un programma di simulazione energetica degli edifici e calibrano su esso le varie grandezze fisiche di input, allo scopo di far coincidere il più possibile la quantità di energia misurata con quella predetta dal programma di simulazione. Questi tipi di modelli possono essere utilizzati quando si hanno solo misure sul consumo energetico dell'intero fabbricato, ma sono generalmente molto dispendiosi in termini di

impegno, e richiedono un'elevata competenza e conoscenza dei programmi di simulazione e dei processi legati agli impianti e ai fenomeni che interessano gli edifici. L'approccio dei modelli grey-box, a differenza degli altri due, formula dapprima un modello fisico che cerchi di rappresentare la struttura fisica dell'edificio o degli impianti HVAC presenti al suo interno, dopodiché identifica importanti parametri aggregati che siano rappresentativi del sistema in esame attraverso un'analisi statistica. Si tratta quindi di modelli "misti", che richiedono un'ottima capacità sia di scelta e corretta impostazione delle equazioni da utilizzare, sia di stima dei parametri appropriati. Hanno però un grande potenziale per quanto concerne il rilevamento e la diagnosi di guasti e per il controllo da remoto, ma non sempre possono essere applicati per il consumo di energia dell'intero edificio.

I modelli data-driven possono anche essere classificati in base al tipo di intervalli temporali elementari usati per l'analisi. I modelli stazionari fanno uso di dati climatici e operazionali su base giornaliera o mensile, per cui non vengono considerati effetti come la massa interna o la capacità termica dell'edificio, o l'effettivo orario di funzionamento dell'impianto, o la variabilità delle condizioni occupazionali nell'arco della giornata, che sono causa di transitori di temperatura di breve periodo. I modelli dinamici invece, che fanno uso di dati su base oraria o sub-oraria, sono in grado di tenere in conto questi aumenti o diminuzioni della temperatura e di prevedere i picchi di energia richiesti agli impianti; risultano dunque più precisi degli altri, nonostante siano più complessi e richiedano una quantità elevata di dati e misure.

1.2. Modello semplificato per una valutazione su larga scala

L'algoritmo di calcolo oggetto del lavoro di tesi è un modello inverso, di tipo grey-box: a partire dal metodo semplificato per il bilancio di energia è stata costruita un'equazione nella quale le variabili di input costituiscono quei parametri fisici, geometrici e climatici che incidono sui consumi energetici nella stagione invernale, mentre la variabile di output rappresenta il consumo specifico di energia per il riscaldamento. Nonostante il modello sia tecnicamente stazionario, in quanto derivato dal metodo semplificato, anch'esso stazionario, i consumi relativi agli edifici che compongono il campione utilizzato per la regressione lineare sono stati calcolati mediante un software di simulazione energetica in regime dinamico, dunque tiene intrinsecamente conto degli effetti dinamici.

Si tratta di un modello semplificato che ha lo scopo di stimare il consumo energetico su vasta scala - sulla base degli obiettivi del lavoro -, e per tali motivi non può avere il livello di precisione di un modello diretto applicato a un edificio specifico per esempio, perché i dati di input sono un numero minore, e alcuni anche più approssimativi.

1.3. Esempi applicativi

In letteratura scientifica sono stati sviluppati modelli semplificati utilizzati su larga scala per predire il consumo energetico di alcune categorie di edifici.

È stato per esempio sviluppato presso il Lawrence Berkeley National Laboratory dell'università della California un toolkit di retrofit energetico, chiamato CBES (Commercial Building Energy Saver), che si propone di svolgere un'analisi speditiva di retrofit su piccoli edifici commerciali. [4] È rivolta ai proprietari di immobile, o ai manager di impresa, che vogliono riqualificare i propri immobili, ma che non hanno le competenze per studiare quali soluzioni di intervento risultano maggiormente convenienti e che in questo modo possono con facilità stimare le soluzioni più convenienti. Sono incluse al suo interno cento tipologie di interventi di retrofit, che possono essere applicate a sette tipologie di edifici, di sei possibili epoche di costruzione e appartenenti a sedici diverse località.

L'obiettivo dello studio in cui si colloca il presente lavoro di tesi è sostanzialmente analogo, anche se l'oggetto di indagine sono gli edifici condominiali.

2. Determinazione dell'algoritmo di calcolo

L'algoritmo di calcolo sviluppato all'interno del tool, come accennato in precedenza, permette di calcolare il consumo energetico annuale stimato per la climatizzazione invernale. La sua determinazione è stata articolata in due fasi distinte:

- In un primo momento si è ricavata, a partire dal metodo semplificato per il bilancio di energia, l'equazione del fabbisogno tramite un'analisi di regressione su un campione di più di 60 edifici appartenenti ad una stessa località e aventi tutti la medesima orientazione delle facciate principali.
- Successivamente si è potuto derivare l'espressione del consumo energetico di edifici non necessariamente della stessa località o con la stessa orientazione del campione attraverso l'aggiunta di opportuni fattori correttivi.

2.1. Dal metodo semplificato all'equazione lineare

Il metodo semplificato appartiene a quella categoria di modelli che assume il carico termico globale come somma dei carichi termici generati dalle varie sollecitazioni subite dall'ambiente, ossia la temperatura esterna, la radiazione solare, le sorgenti interne di calore. Il sistema termodinamico a cui si fa riferimento è costituito dall'insieme dell'edificio e dell'aria al suo interno. Generalmente si può esprimere il bilancio in due modi: considerando solo i carichi sensibili, oppure anche quelli latenti. I carichi sensibili sono tutti quei trasferimenti di calore, che avvengono per conduzione, convezione o irraggiamento, e che determinano un cambiamento della temperatura dell'ambiente interno; i carichi latenti invece sono tutti quei trasferimenti di vapore acqueo che determinano un cambiamento dell'umidità relativa dell'ambiente interno. [3]

Nel caso in esame, si è deciso di far riferimento al bilancio di energia sensibile, utilizzato per determinare il carico sensibile di riscaldamento. Trascurando l'accumulo di calore nell'aria dell'ambiente interno e l'inerzia termica dell'edificio, si può scrivere il bilancio, in condizioni stazionarie e su base stagionale, come:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} - Q_{H,sol} - Q_{H,int} \quad [\text{kWh}] \quad (2.1)$$

dove:

- $Q_{H,nd}$ è il fabbisogno termico utile per il riscaldamento (in kWh);
- $Q_{H,tr}$ è l'energia termica scambiata per trasmissione attraverso le superfici di confine (in kWh);
- $Q_{H,ve}$ è l'energia termica scambiata per ventilazione (in kWh);
- $Q_{H,sol}$ è l'energia termica introdotta in ambiente dalla radiazione solare attraverso le superfici di confine (in kWh);
- $Q_{H,int}$ è l'energia termica prodotta dalle sorgenti interne (in kWh).

In forma semplificata, l'energia scambiata per trasmissione termica ($Q_{H,tr}$) si determina come:

$$Q_{H,tr} = \sum_i (U_i \cdot A_i \cdot b_i) \cdot GG \cdot 24 \quad [\text{kWh}] \quad (2.2)$$

dove la sommatoria si riferisce ad ogni i-esimo componente dell'involucro edilizio (pareti perimetrali, serramenti, solaio inferiore, solaio superiore), e:

- U_i è la trasmittanza termica dell'i-esimo componente (in kW/ (m² K));
- A_i è l'area dell'i-esimo componente (in m²);
- b_i è il fattore di correzione (adimensionale, variabile tra 0 e 1) della temperatura per l'ambiente non climatizzato adiacente;
- GG sono i gradi-giorno della località (in GG).

L'energia scambiata per ventilazione ($Q_{H,ve}$) si determina come:

$$Q_{H,ve} = n \cdot V \cdot \frac{\rho_a \cdot c_a}{3600} \cdot GG \cdot 24 \quad [\text{kWh}] \quad (2.3)$$

dove:

- n è il tasso di ricambio di aria per ventilazione naturale (in h⁻¹);
- V è il volume netto dell'ambiente climatizzato (in m³);

- ρ_a è la massa volumica dell'aria (in kg/m^3);
- c_a è il calore specifico dell'aria (in $\text{kJ}/(\text{kg K})$);
- GG sono i gradi-giorno della località (in GG).

Gli apporti termici dalle sorgenti di calore interne ($Q_{H,int}$) si ricavano come:

$$Q_{H,int} = \Phi_{int} \cdot \tau \quad [\text{kWh}] \quad (2.4)$$

dove:

- Φ_{int} è la potenza termica delle sorgenti di calore interne (in W), determinata in funzione dell'uso dell'edificio;
- τ è la durata della stagione di riscaldamento (in h).

Gli apporti termici di origine solare possono essere suddivisi tra apporti solari entranti in ambiente dai componenti trasparenti (serramenti) ($Q_{H,sol,w}$) e apporti solari entranti in ambiente dai componenti opachi ($Q_{H,sol,op}$) dell'involucro edilizio:

$$Q_{H,sol,w} = \sum_i (F_{sh,i} \cdot g_{gl,i} \cdot A_{gl,i} \cdot I_{sol,i}) \cdot \tau \quad [\text{kWh}] \quad (2.5)$$

$$Q_{H,sol,op} = \sum_j (\alpha_j \cdot A_j \cdot U_j \cdot R_{se,j} \cdot I_{sol,j}) \cdot \tau \quad [\text{kWh}] \quad (2.6)$$

dove le sommatorie si riferiscono, rispettivamente, ad ogni i-esimo componente trasparente dell'involucro edilizio e ad ogni j-esimo componente opaco dell'involucro edilizio, e dove:

- $F_{sh,i}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura (adimensionale);
- $g_{gl,i}$ è la trasmittanza di energia solare totale del vetro (adimensionale);
- $A_{gl,i}$ è l'area del vetro (in m^2);
- α_j è il coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna opaca (adimensionale);
- A_j è l'area del componente opaco (in m^2);
- U_j è la trasmittanza termica del componente opaco (in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$);
- $R_{se,j}$ è la resistenza termica superficiale esterna del componente (in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$);

- $I_{sol,i/j}$ è l'irradianza solare incidente sul componente (in kW/m²);
- τ è la durata della stagione di riscaldamento (in h).

A partire dalle equazioni appena descritte, è stata costruita l'equazione di regressione lineare multipla che lega la variabile di output (y'), dipendente, e che rappresenta il fabbisogno termico utile dell'edificio, alle variabili di input (x_i), indipendenti, e che rappresentano i termini del bilancio di energia dell'edificio.

L'equazione assume la seguente forma:

$$y' = A \cdot x_1 + B \cdot x_2 + C \cdot x_3 + D \cdot x_4 + E \cdot x_5 + F \cdot x_6 + G \cdot x_7 + H \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (2.7)$$

Nello specifico, la variabile y' rappresenta il fabbisogno termico utile dell'edificio per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) normalizzato sulla superficie utile di pavimento riscaldata dell'edificio (A_{netta}), espresso in kWh/m². Ciascuna variabile indipendente x quindi è a sua volta normalizzata sulla stessa superficie di pavimento.

Le variabili x sono espressioni di proprietà dell'edificio e del sito, come le superfici e le caratteristiche geometriche e termofisiche dei componenti edilizi. Le variabili x_1, x_2, x_3 , e x_4 dell'equazione includono i parametri di trasmissione termica (equazione 2.2), relativi, rispettivamente, alle pareti perimetrali, ai serramenti, al solaio superiore e al solaio inferiore. Le variabili x_5 e x_6 rappresentano gli apporti solari entranti, rispettivamente, dai componenti vetrati e dai componenti opachi (equazioni 2.5 e 2.6). La variabile x_7 rappresenta la ventilazione (equazione 2.3). Gli apporti interni (equazione 2.4) sono contenuti all'interno della costante H .

Poiché l'equazione descrive il fabbisogno energetico di un edificio condominiale inserito in un contesto urbano e con la presenza di un utente standard, all'interno del modello di calcolo alcuni fattori che comparivano nell'equazione di bilancio sono stati inglobati nei coefficienti che accompagnano le variabili perché considerati costanti, quali: la capacità termica volumica dell'aria ($\rho_a \cdot c_a$), il fattore di riduzione per ombreggiatura (F_{sh}), la resistenza termica superficiale esterna dei componenti d'involucro (R_{se}), il tasso di ricambio di aria per ventilazione naturale (n), la potenza termica delle sorgenti interne di calore (Φ_{int}).

2.2. Dall'equazione lineare all'algoritmo di calcolo

L'equazione lineare precedentemente presentata è stata successivamente modificata attraverso l'aggiunta di opportuni fattori per poter estendere lo studio su edifici in località differenti da quelle del campione e aventi una differente orientazione in pianta. I fattori f_{GG} , f_{IRR} e f_{OR} sono parametri dipendenti dal sito. Il fattore f_{GG} è un fattore correttivo dei gradi-giorno e compare in tutti i termini dell'equazione che dipendono dalla temperatura esterna. Il fattore f_{IRR} è un fattore correttivo dell'irradianza solare, mentre il fattore f_{OR} è un fattore correttivo dell'orientamento dell'asse principale dell'edificio: compaiono entrambi nei termini dell'equazione che dipendono dall'irraggiamento solare.

A seguito di queste aggiunte l'equazione risulta essere:

$$y' = A \cdot x_1 \cdot f_{GG} + B \cdot x_2 \cdot f_{GG} + C \cdot x_3 \cdot f_{GG} + D \cdot x_4 \cdot f_{GG} + E \cdot x_5 \cdot f_{IRR} \cdot f_{OR} + F \cdot x_6 \cdot f_{IRR} \cdot f_{OR} + G \cdot x_7 \cdot f_{GG} + H \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (2.8)$$

L'ultimo fattore aggiunto all'equazione è quello che permette di passare dal fabbisogno specifico di energia per il riscaldamento all'energia effettivamente consegnata all'edificio, che si determina, sempre facendo riferimento al metodo semplificato, come:

$$Q_{H,del} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta} \quad [\text{kWh}] \quad (2.9)$$

dove:

- $Q_{H,nd}$ è il fabbisogno termico utile per il riscaldamento (in kWh);
- η è l'efficienza globale media stagionale dell'impianto di riscaldamento (adimensionale);
- $Q_{H,del}$ è la quantità di energia consegnata all'edificio per il riscaldamento (in kWh).

La quantità annuale di energia consegnata all'edificio per il riscaldamento (y), sempre normalizzata sulla superficie utile di pavimento riscaldata dell'edificio (A_{netta}) ed espressa in kWh/m², si determina quindi come:

$$y = \frac{y'}{\eta} \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (2.10)$$

2.3. Definizione delle variabili

L'equazione che consente il calcolo del consumo specifico annuale di energia consegnata all'edificio, espresso in kWh/m², risulta quindi essere la seguente:

$$y = \frac{A \cdot x_1 \cdot f_{GG} + B \cdot x_2 \cdot f_{GG} + C \cdot x_3 \cdot f_{GG} + D \cdot x_4 \cdot f_{GG} + E \cdot x_5 \cdot f_{IRR} \cdot f_{OR} + F \cdot x_6 \cdot f_{IRR} \cdot f_{OR} + G \cdot x_7 \cdot f_{GG} + H}{\eta}$$

Nella tabella successiva viene riportato l'elenco delle variabili e dei coefficienti che compaiono nella formula, con le rispettive equazioni di determinazione e le unità di misura:

VARIABILI					COEFFICIENTI	
Dipendenti dall'edificio			Dipendenti dal sito			
Simbolo	Equazione	Unità di misura	Simbolo	Unità di misura	Simbolo	Unità di misura
x_1	$U_{op}^* \cdot \frac{A_{op}}{A_{netta}}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	f_{GG}	-	A	kh · K
x_2	$\frac{(U_w \cdot A_w \cdot (1 - \frac{Z}{100}) + 2,5 \cdot A_w \cdot \frac{Z}{100})}{A_{netta}}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	f_{GG}	-	B	kh · K
x_3	$b_r \cdot U_r \cdot \frac{A_r}{A_{netta}}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	f_{GG}	-	C	kh · K
x_4	$b_f \cdot U_f \cdot \frac{A_f}{A_{netta}}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	f_{GG}	-	D	kh · K
x_5	$\frac{(g_{gl} \cdot A_{gl} \cdot (1 - \frac{Z}{100}) + 0,73 \cdot A_{gl} \cdot \frac{Z}{100})}{A_{netta}}$	-	f_{IRR}	-	E	$\frac{kWh}{m^2}$
			f_{OR}	-		
x_6	$\frac{A_{op}}{A_{netta}} \cdot U_{op}^* \cdot \alpha$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	f_{IRR}	-	F	kh · K
			f_{OR}	-		
x_7	h	m	f_{GG}	-	G	$\frac{kWh}{m^3}$
					H	$\frac{kWh}{m^2}$
η	η	-				

Tabella 1 - Variabili e coefficienti dell'algoritmo di calcolo

Gli otto coefficienti A, B, C, D, E, F, G e H sono stati determinati tramite l'analisi di regressione, mentre per quanto riguarda le variabili, esse possono essere dipendenti dal sito oppure dall'edificio.

VARIABILI DIPENDENTI DAL SITO

Le variabili f_{GG} e f_{IRR} assumono un determinato valore a seconda della località in cui si trova l'edificio di interesse, poiché tengono conto delle differenti condizioni climatiche. In particolare, f_{GG} compare nei termini dell'equazione che risentono della temperatura esterna, e cioè quelli che descrivono gli scambi termici per conduzione e ventilazione (le variabili x_1 , x_2 , x_3 , x_4 e x_7). f_{GG} viene determinato come rapporto tra i gradi giorno di riscaldamento della località reale e i gradi giorno della località di riferimento, ossia quella del campione:

$$f_{GG} = \frac{GG_{loc, reale}}{GG_{loc, rifer}} \quad [-] \quad (2.11)$$

f_{IRR} invece compare nei termini dell'equazione che risentono dell'irraggiamento solare, e cioè quelli che descrivono gli apporti solari attraverso le componenti trasparenti e opache (le variabili x_5 e x_6). f_{IRR} viene determinato come rapporto tra l'irradiazione solare totale durante la stagione di riscaldamento della località reale e quella della località di riferimento, ossia quella del campione.

$$f_{IRR} = \frac{I_{loc, reale}}{I_{loc, rifer}} \quad [-] \quad (2.12)$$

Per la determinazione dell'irradiazione totale si è ricorso alla normativa UNI 10349-1 [5], che fornisce per ogni capoluogo di provincia l'irradiazione solare giornaliera media diretta e diffusa su piano orizzontale per ogni mese, e si è utilizzata la seguente formula:

$$I_{loc} = \sum_j [n_j \cdot (\bar{H}_{dir} + \bar{H}_{diff})] \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (2.13)$$

Per ogni mese j appartenente alla stagione invernale di riscaldamento, quindi, si è moltiplicato la somma delle irradiazioni solari giornaliere diretta e diffusa per il numero di giorni del mese contenuti all'interno della stagione di riscaldamento.

La variabile f_{OR} assume un determinato valore a seconda dell'orientamento dell'edificio, poiché tiene conto dell'esposizione che l'asse principale del fabbricato può avere; compare anch'esso nei termini dell'equazione che risentono dell'irraggiamento solare (le variabili x_5 e x_6). Della sua determinazione verrà discusso più in dettaglio nel capitolo successivo.

VARIABILI DIPENDENTI DALL'EDIFICIO

Le variabili x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 , x_7 e η assumono determinati valori a seconda delle caratteristiche costruttive e geometriche dell'edificio in questione.

La variabile x_1 è calcolata con la seguente equazione:

$$x_1 = U_{op}^* \cdot \frac{A_{op}}{A_{netta}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})] \quad (2.14)$$

dove:

- A_{netta} è la superficie utile riscaldata di pavimento (in m^2);
- A_{op} è l'area totale delle pareti opache verticali (in m^2);
- U_{op}^* è la trasmittanza termica media delle pareti opache, corretta per tenere conto dei ponti termici relativi a balconi, serramenti, pilastri e della presenza eventuale dei cassonetti delle tapparelle avvolgibili (in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$).

U_{op}^* viene a sua volta calcolata nel modo seguente:

$$U_{op}^* = \frac{U_{op} \cdot A_{muri} + U_{pil} \cdot A_{pil} + U_{cass} \cdot A_{cass} + \psi_{bal} \cdot l_{bal} + \psi_{serr} \cdot l_{serr}}{A_{op}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})] \quad (2.15)$$

dove:

- U_{op} è la trasmittanza termica delle pareti (in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$);
- U_{pil} è la trasmittanza termica relativa ai pilastri (in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$);
- U_{cass} è la trasmittanza termica relativa ai cassonetti (in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$);
- ψ_{bal} è la trasmittanza termica lineica relativa al giunto balcone-parete (in $\text{W}/(\text{m} \text{K})$);

- l_{bal} è la lunghezza totale del ponte termico balcone-parete (in m);
- ψ_{serr} è la trasmittanza termica lineica relativa al contatto tra parete e serramento (in W/ (m K));
- l_{serr} è la lunghezza totale del ponte termico parete-serramento (in m);
- A_{pil} è la superficie occupata dai pilastri (in m²);
- A_{cass} è la superficie relativa ai cassonetti (in m²);
- A_{muri} la parte della parete opaca non interessata da pilastri o cassonetti (in m²):

$$A_{muri} = A_{op} - A_{pil} - A_{cass} \quad [\text{m}^2] \quad (2.16)$$

La variabile x_2 è calcolata mediante la seguente equazione:

$$x_2 = \frac{(U_w \cdot A_w \cdot \left(1 - \frac{Z}{100}\right) + 2,5 \cdot A_w \cdot \frac{Z}{100})}{A_{netta}} \quad [\text{W}/ (\text{m}^2 \text{K})] \quad (2.17)$$

dove:

- U_w è la trasmittanza termica dei serramenti (in W/ (m² K));
- A_w è l'area totale dei serramenti (in m²);
- Z è il numero espresso in percentuale dei serramenti dell'edificio che sono già stati sostituiti, a cui viene associato un valore di trasmittanza termica pari a 2,5 W/ (m²K), valore tipico di un vetro-camera chiaro (in %).

La variabile x_3 viene determinata mediante la seguente equazione:

$$x_3 = b_r \cdot U_r \cdot \frac{A_r}{A_{netta}} \quad [\text{W}/ (\text{m}^2 \text{K})] \quad (2.18)$$

dove:

- b_r è il fattore di correzione per l'ambiente adiacente al solaio superiore (adimensionale);
- U_r è la trasmittanza termica del solaio superiore (in W/ (m² K));
- A_r è la superficie occupata dal solaio superiore (in m²).

La variabile x_4 viene calcolata mediante la seguente equazione:

$$x_4 = b_f \cdot U_f \cdot \frac{A_f}{A_{netta}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})] \quad (2.19)$$

dove:

- b_f è il fattore di correzione per l'ambiente adiacente al solaio inferiore (adimensionale);
- U_f è la trasmittanza termica del solaio inferiore (in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$);
- A_f è la superficie occupata dal solaio inferiore (in m^2).

La variabile x_5 viene determinata mediante la seguente equazione:

$$x_5 = \frac{(g_{gl} \cdot A_{gl} \cdot \left(1 - \frac{Z}{100}\right) + 0,73 \cdot A_{gl} \cdot \frac{Z}{100})}{A_{netta}} \quad [-] \quad (2.20)$$

dove:

- g_{gl} rappresenta il fattore solare del vetro trasparente (adimensionale);
- A_{gl} la superficie totale della parte vetrata dei serramenti (in m^2);
- Z è come nella variabile x_2 il numero espresso in percentuale dei serramenti dell'edificio che sono già stati sostituiti, a cui viene associato un valore di fattore solare pari a 0,73, valore tipico di un vetro-camera chiaro (in %).

La variabile x_6 viene calcolata tramite la seguente equazione:

$$x_6 = \frac{A_{op}}{A_{netta}} \cdot U_{op}^* \cdot \alpha \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})] \quad (2.21)$$

dove:

- α è il coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna opaca (adimensionale);
- U_{op}^* è la trasmittanza termica delle pareti corretta, già presente all'interno della variabile x_1 (in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$);
- A_{op} è la superficie totale delle pareti opache verticali (in m^2).

La variabile x_7 viene determinata tramite la seguente equazione:

$$x_7 = h \quad [m] \quad (2.22)$$

dove h è l'altezza netta del piano tipo dell'edificio (in m).

Infine, la variabile η rappresenta il rendimento medio stagionale dell'impianto che provvede al riscaldamento dell'edificio e che tiene conto di tutti i sottosistemi presenti, ossia quello di generazione, di accumulo, di distribuzione, di regolazione e di emissione. I valori, già pre-calcolati, che può assumere la variabile a seconda del tipo di generatore sono stati derivati dalla normativa UNI/TS 11300-2 [6].

CARATTERISTICHE FISSE LEGATE ALL'UTENZA

All'interno del modello alcune componenti del bilancio energetico solitamente variabili in uno studio di prestazione energetica perché dipendenti dall'utenza sono lasciate volutamente costanti, allo scopo di standardizzare l'equazione di calcolo.

APPORTI INTERNI

Per la valutazione del calore generato internamente dagli occupanti e dalle apparecchiature presenti si è ricorso alla specifica tecnica UNI/TS 11300-1 [7], che presenta profili temporali di apporti termici per edifici residenziali, differenziati per fasce orarie e giorni della settimana (normalizzati sulla superficie utile riscaldata di riscaldamento):

Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (edifici residenziali)

Giorni	Ore	Soggiorno e cucina ($\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}/A_f$) W/m ²	Altre aree climatizzate (per esempio stanza da letto) ($\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}/A_f$) W/m ²
Lunedì - Venerdì	07.00 - 17.00	8,0	1,0
	17.00 - 23.00	20,0	1,0
	23.00 - 07.00	2,0	6,0
	Media	9,0	2,67
Sabato - Domenica	07.00 - 17.00	8,0	2,0
	17.00 - 23.00	20,0	4,0
	23.00 - 07.00	2,0	6,0
	Media	9,0	3,83
Media		9,0	3,0

Figura 1 - Profili temporali degli apporti interni nella norma UNI/TS 11300-1

Avendo ipotizzato per semplicità gli appartamenti composti per metà della superficie utile di pavimento da soggiorno e cucina e per l'altra metà da altre aree climatizzate, sono stati determinati, facendo una media tra le due parti dell'alloggio, i seguenti profili temporali di apporti per i giorni feriali e quelli festivi:

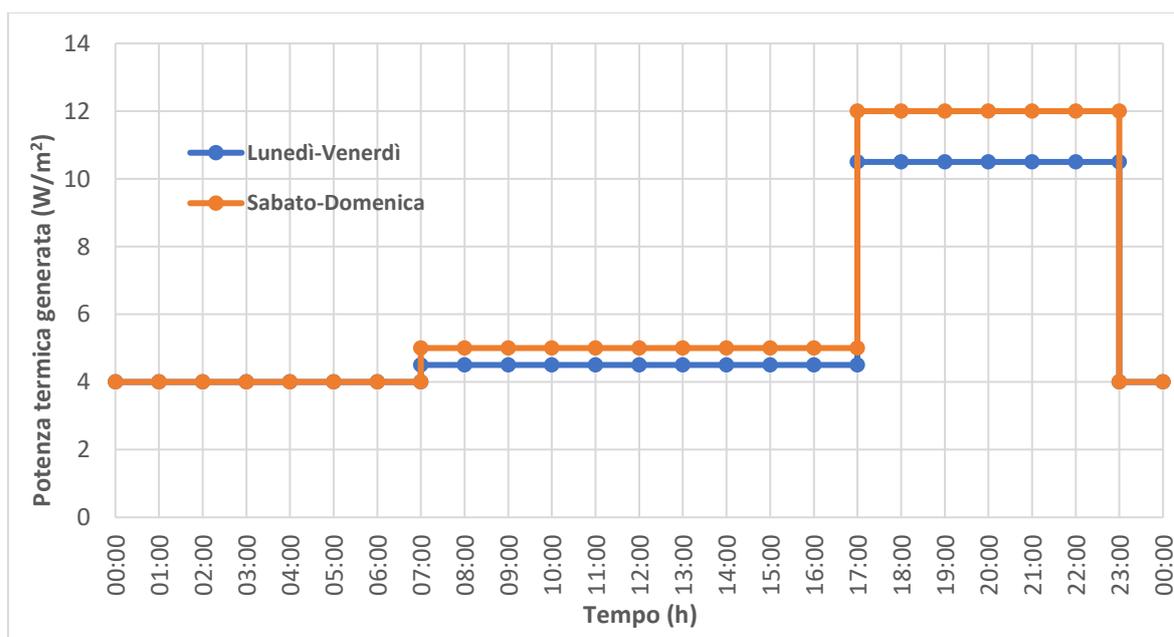


Figura 2 - Profilo temporale della potenza termica generata dagli apporti interni

VENTILAZIONE

Per quanto concerne la ventilazione, il riferimento normativo è stato la norma EN 16798-1 [8], che prescrive un ricambio medio durante il periodo invernale di 0,4 volumi/ora. I profili temporali sono stati costruiti seguendo l'andamento di quelli relativi agli apporti interni, facendo comunque in modo che nell'arco di una settimana il valor medio di ricambi rimanesse quello precedentemente citato.

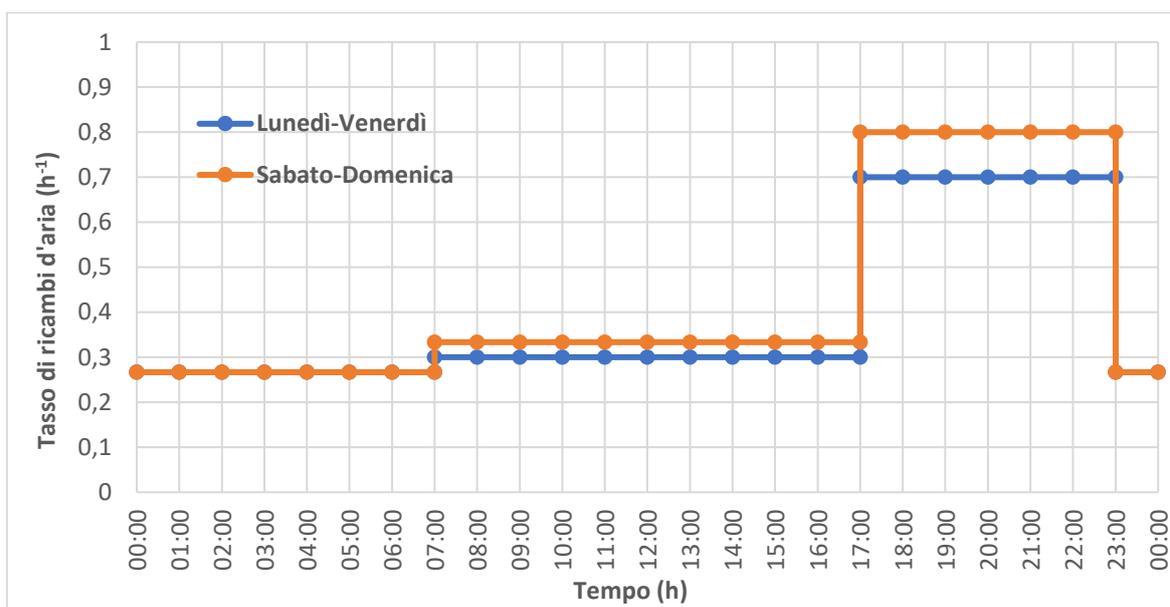


Figura 3 - Profilo temporale del tasso di ricambi d'aria

FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO DI RISCALDAMENTO

L'impianto che fornisce energia all'edificio per il riscaldamento degli ambienti durante la stagione invernale è stato considerato avere un profilo di funzionamento giornaliero caratterizzato dall'essere attivo per 14 ore su 24 (dalle ore 6 alle ore 13 e dalle ore 15 alle ore 22); la temperatura di set-point è stata fissata a 20 °C, mentre durante le ore in cui l'impianto è spento la temperatura è lasciata libera di scendere.

3. Sviluppo del modello

Il modello precedentemente descritto è stato formulato, come già visto, a partire dal metodo semplificato. La determinazione dei coefficienti che lo caratterizzano è stata articolata in diverse fasi:

- Dapprima è stato costituito un campione rappresentativo di edifici appartenenti ad una medesima località e aventi la medesima orientazione in pianta. Su di essi è stato calcolato il fabbisogno energetico mediante l'impiego di un software di simulazione energetica in regime dinamico.
- Successivamente sono stati determinati i coefficienti, da A a H, che compaiono nell'equazione mediante una regressione lineare multipla, nella quale le variabili di input sono le variabili precedentemente descritte, da x_1 a x_7 , e quella di output il fabbisogno energetico.
- Si è potuto in seguito derivare l'espressione del fabbisogno energetico di edifici non necessariamente della stessa località o con la stessa orientazione del campione attraverso l'aggiunta di opportuni fattori correttivi della località o dell'orientamento.
- Infine si è ricavato il consumo energetico a partire dal fabbisogno precedentemente ricavato, attraverso l'utilizzo del rendimento medio stagionale dell'impianto di riscaldamento. I valori utilizzati sono riportati nell'allegato B.

L'algoritmo si basa, come visto, sulla relativa semplicità, che lo differenzia da tipologie di metodi di più difficile attuazione. Vi sono all'interno pertanto una serie di semplificazioni, in quanto alcune variabili fisiche, usate solitamente per calcoli energetici un po' più precisi, mancano come variabili di input. Queste sono per esempio:

- La capacità termica, che determina la risposta dell'edificio, più o meno ritardata nel tempo, a sollecitazioni interne ed esterne di calore o di temperatura;
- L'ombreggiamento degli oggetti esterni verticali e orizzontali che influenza la quantità di apporti solari che l'edificio riceve.

Queste due grandezze non sono rappresentate nel modello, tuttavia sono state accuratamente considerate nella fase di simulazione del fabbisogno degli edifici del campione. Si può perciò affermare che tali variabili sono intrinsecamente incluse nel

modello, e vengono considerate caratteristiche del campione, ossia capacità termica associata a tecnologie d'involucro tradizionale utilizzate in edifici multipiano e ombreggiatura tipica di un centro abitato.

3.1. Strumento di simulazione dinamica dettagliata

Per la simulazione del fabbisogno energetico degli edifici del campione si è ricorso all'impiego di DesignBuilder [9], un programma che fa da interfaccia grafica al software di calcolo EnergyPlus [10]. Quest'ultimo, operando in regime dinamico, permette di determinare tutti i flussi termici ed elettrici relativi all'edificio soggetto all'analisi, con un notevole grado di dettaglio.

Il programma è principalmente costituito da tre moduli fondamentali: [11]

- Il *surface heat balance manager*, deputato al calcolo del bilancio termico in corrispondenza della superficie di ogni parete;
- L'*air heat balance manager*, che ha il compito di risolvere il bilancio termico dell'ambiente attraverso la simulazione simultanea degli scambi di tipo convettivo e radiativo;
- Il *building systems simulation manager*, che invece simula i componenti impiantistici.

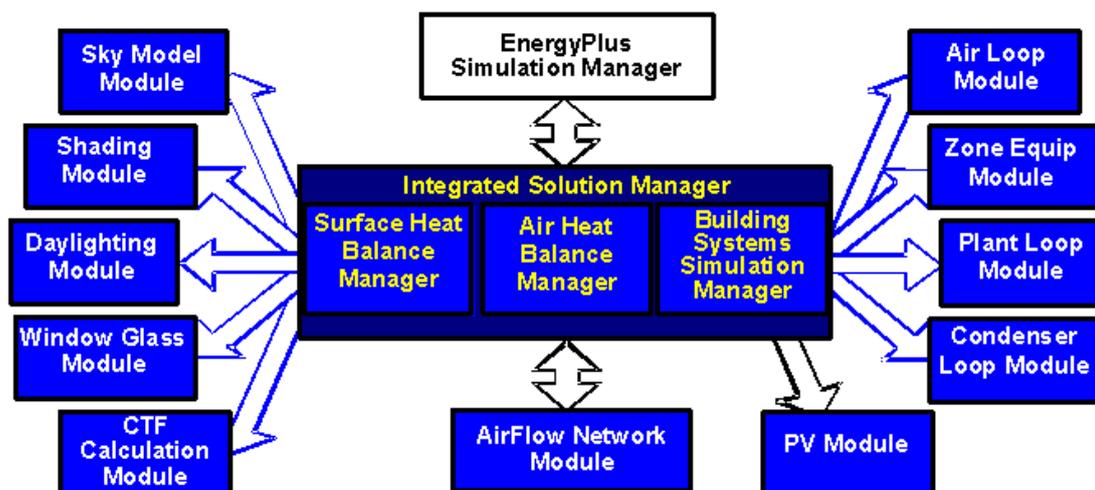


Figura 4 – Schema delle relazioni tra i moduli principali di EnergyPlus

A loro volta questi moduli sono contenuti, insieme ad altri secondari, all'interno dell'*integrated solution manager*, che permette di risolvere i tre moduli simultaneamente e non in cascata, per consentire di giungere ad un livello di precisione maggiore. Il calcolo viene svolto attraverso successive iterazioni tra la domanda di energia richiesta dall'edificio e l'offerta di energia dell'impianto di climatizzazione.

Il *surface heat balance manager* comprende una serie di moduli che determinano le temperature superficiali e i flussi termici in corrispondenza delle facce interne ed esterne delle pareti.

Il bilancio termico dell'aria ambiente, invece, svolto dall'*air heat balance manager*, si basa su alcune considerazioni:

- temperatura dell'aria uniforme (completa miscelazione);
- temperatura di ogni superficie (pareti interne verticali e orizzontali) uniforme;
- irraggiamento uniforme, sia a bassa che ad alta lunghezza d'onda;
- diffusività delle superfici uniforme;
- flusso termico per conduzione attraverso le pareti monodimensionale.

L'equazione cardine di questo bilancio, trascurando l'infiltrazione e la ventilazione tra zone adiacenti, può essere scritta nel seguente modo:

$$C_Z \frac{dT_Z}{dt} = \sum_{i=1}^N h_i \cdot A_i \cdot (T_{s,i} - T_Z) + \dot{Q}_V + \dot{Q}_{i,c} + \dot{Q}_{HVAC,c} \quad [W] \quad (3.1)$$

dove:

- C_Z è la capacità termica dell'aria della zona e delle masse termiche in equilibrio con essa;
- T_Z è la temperatura dell'aria della zona;
- h_i è il coefficiente convettivo di scambio termico tra l'aria e la parete i-esima;
- A_i è la superficie della parete i-esima;
- $T_{s,i}$ è la temperatura della parete i-esima;
- \dot{Q}_V è il flusso termico per ventilazione;
- $\dot{Q}_{i,c}$ è la parte convettiva del flusso termico dovuto alle sorgenti interne di calore;
- $\dot{Q}_{HVAC,c}$ è la parte convettiva del flusso termico dovuto all'impianto.

Il *building systems simulation manager* si basa su tre principali sottosistemi per modellare l'impianto: l'*air loop*, il *plant loop* e il *condenser loop*; il primo è deputato alle reti aerauliche, mentre gli altri due a quelle idroniche.

Ai fini del calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio entrano in gioco soltanto il *surface heat balance* e l'*air heat balance manager*, in quanto propri del sistema edificio, e non il *building systems simulation manager*, poiché si occupa dello studio dell'impianto che fornisce energia.

4. Analisi del campione di calcolo

Il campione oggetto di analisi per la determinazione dei coefficienti dell'equazione è costituito da 62 edifici, tutti ipotizzati localizzati in Torino e con asse principale disposto lungo la direzione est-ovest. Si tratta in realtà di edifici virtuali, creati come varianti di un edificio reale, considerato rappresentativo del parco edilizio residenziale della classe dei blocchi di appartamenti in zona climatica E, dell'epoca di costruzione 1946-60. Di seguito viene descritto nelle sue caratteristiche principali.

4.1. Descrizione dell'edificio-base

Fabbricato

L'edificio numero 1 del campione, definito come caso-base, si trova nel quartiere San Donato della città di Torino.



Figura 5 - Localizzazione dell'edificio-tipo

Lo stabile comprende due numeri civici, in corrispondenza di ciascuno dei quali è presente un vano scala, e presenta tutte e quattro le facce esposte verso l'esterno, ad eccezione di quella laterale del piano terreno che confina con un basso fabbricato.

L'edificio, le cui dimensioni in pianta sono 27,50 m per 11,50 m, è dotato di un piano seminterrato adibito a cantine, di 5 piani fuori terra adibiti ad appartamenti, con sei appartamenti per piano (tre per ogni vano scala), e da un sottotetto non abitabile. L'altezza netta degli appartamenti del piano terreno è di 3,15 metri, mentre quella relativa ai piani superiori è ridotta a 3 metri.

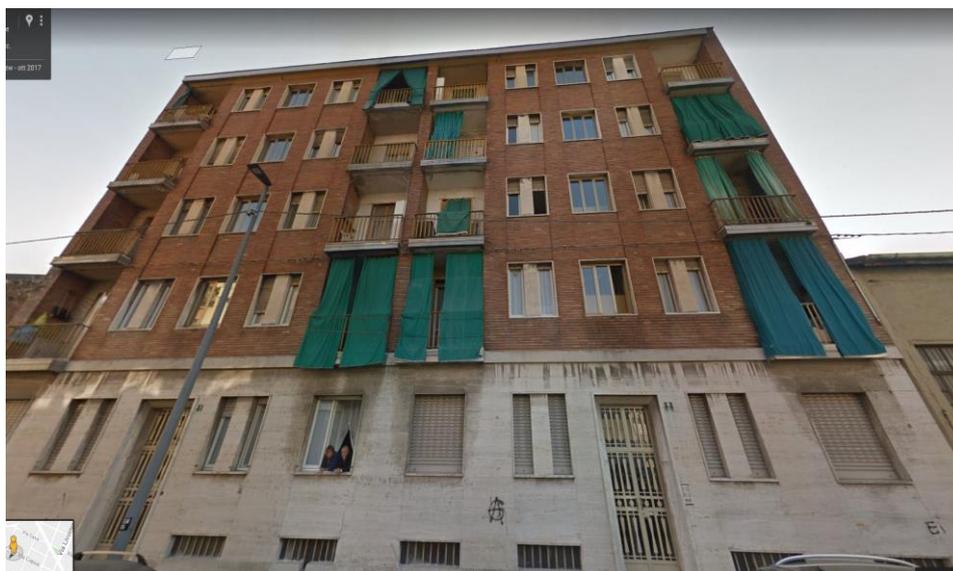


Figura 6 - Facciata principale dell'edificio-tipo

Di seguito vengono riportate le planimetrie del piano terra e del piano tipo, recuperate dal catasto di Torino.

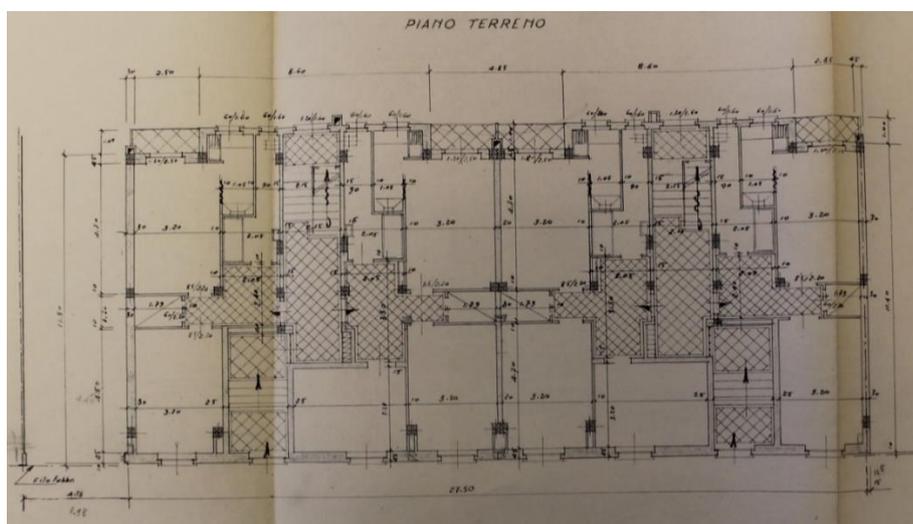


Figura 7 - Planimetria del piano terra

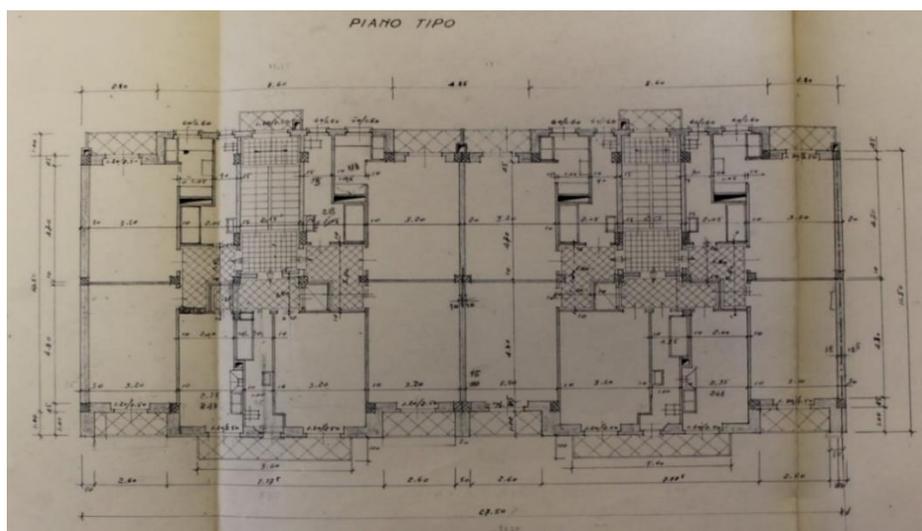


Figura 8 - Planimetria del piano-tipo

La struttura portante viene descritta dall'attestato di prestazione energetica essere in calcestruzzo armato, con tamponamenti esterni in muratura a cassa vuota, mentre i serramenti sono di tipo tradizionale in legno e vetro singolo.

In assenza di informazioni più dettagliate sulle varie stratigrafie dei componenti d'involucro opaco e trasparente, si è deciso di far riferimento a quelle presenti all'interno del database del progetto di ricerca europeo TABULA (*Typology Approach for BUilDing stock energy Assessment*) [12], nel quale sono presentate varie tipologie costruttive per i vari componenti d'involucro, accompagnate ognuna da un'indicazione sul periodo storico di massima diffusione e da un valore medio di trasmittanza termica. In particolare, per quanto riguarda le pareti perimetrali la stratigrafia che è stata scelta è quella di parete in muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati, da 45 cm, non isolata:

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	15	-	1000	1	0,18
Laterizio pieno	20	0,90	840	2000	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	45 cm				
Trasmittanza termica	1,271 W/m ² K				

Tabella 2 - Stratigrafia delle pareti esterne

Per quanto concerne il solaio inferiore e quello superiore sono stati scelti solai latero-cementizi, entrambi non isolati.

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Piastrelle	1	2300	840	1,00	-
Calcestruzzo	8	900	1000	0,58	-
Solaio	16	1800	840	-	0,35
Intonaco	1	1800	840	0,90	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	26 cm				
Trasmittanza termica	1,300 W/m ² K				

Tabella 3 - Stratigrafia del solaio inferiore

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	1400	840	0,70	-
Solaio	18	1800	840	-	0,33
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	20 cm				
Trasmittanza termica	1,617 W/m ² K				

Tabella 4 - Stratigrafia del solaio superiore

Per il solaio interpiano invece si è adottata la seguente stratigrafia:

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	1400	840	0,70	-
Solaio	18	1800	840	-	0,33
Calcestruzzo	4	2000	880	1,16	-
Piastrelle	1	2300	840	1,00	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	25 cm				
Trasmittanza termica	1,508 W/m ² K				

Tabella 5 - Stratigrafia del solaio interpiano

Per quanto riguarda i serramenti si è ricorso alla combinazione di vetro singolo e telaio in legno:

Tipologia di vetro	Trasmittanza termica vetro (W/ (m ² K))	Tipologia di telaio	Trasmittanza termica telaio (W/ (m ² K))	Trasmittanza termica finestra (W/ (m ² K))	Coefficiente di trasmissione solare (-)
Singolo (6 mm)	5,78	Legno (6 cm)	2,06	5,04	0,819

Tabella 6 - Caratteristiche dei serramenti

Modello su Design Builder

Dopo la scelta delle varie stratigrafie si è proceduto alla simulazione dinamica su Design Builder. Viene riportata di seguito l'immagine del modello tridimensionale dell'edificio.

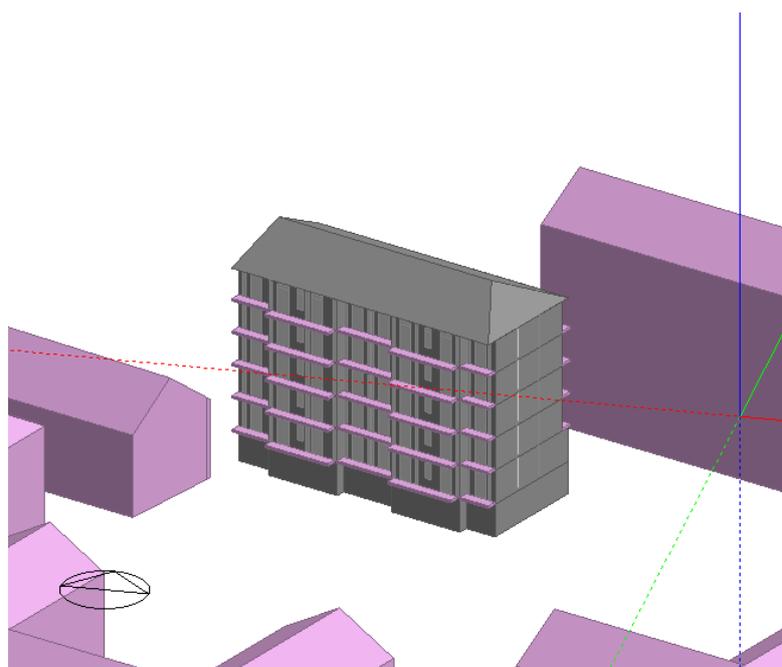


Figura 9 - Modello dell'edificio su DesignBuilder

Come si nota, l'edificio è stato considerato con tutte e quattro le facciate libere, per ragioni di semplicità; del resto lo scopo di queste simulazioni non è quello di calcolare il fabbisogno su un edificio reale, quanto piuttosto di avere un insieme di dati su cui poi poter eseguire un'inferenza statistica.

Sono stati modellati anche i fabbricati circostanti, ai fini dell'ombreggiamento.

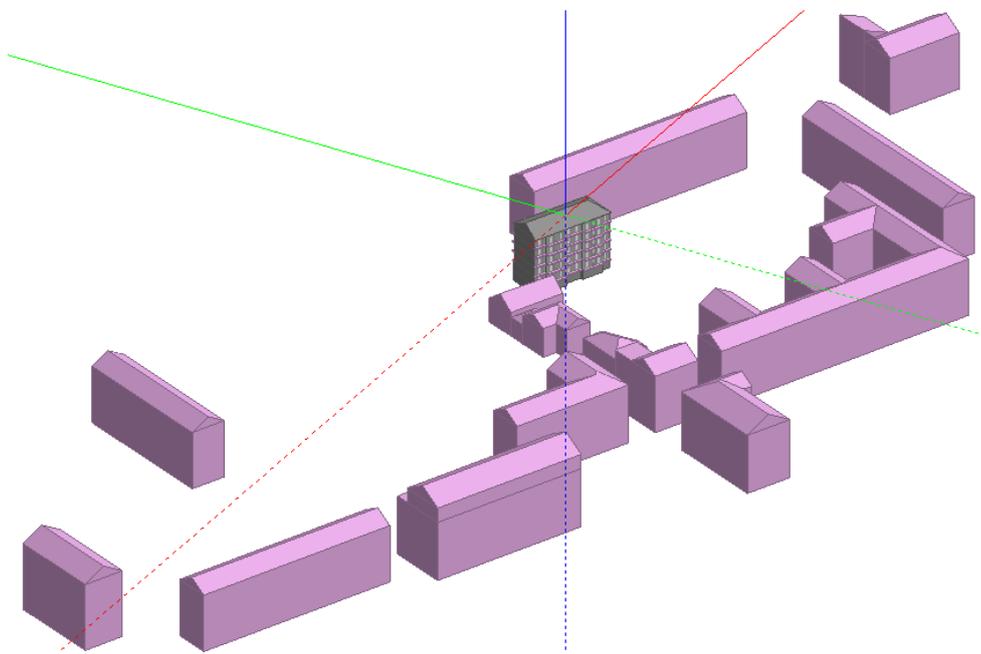


Figura 10 - Modellazione dei fabbricati circostanti

Per la determinazione degli apporti interni e del carico di ventilazione, si è proceduto concordemente a quanto già descritto nel capitolo 2.3, e sono stati dunque creati profili temporali differenziati per fasce orarie e giorni della settimana. Anche l'impianto di riscaldamento è stato considerato in funzione negli stessi orari specificati in precedenza, ossia dalle 6 alle 13 e dalle 15 alle 22.

Per la zonizzazione dell'edificio, si è voluto dividere tra loro gli ambienti che avevano differente orientazione, dato che non vi erano differenze negli apporti interni o nei carichi di ventilazione, ma solo negli apporti solari, nelle varie ore della giornata. La figura seguente mostra come sono stati raggruppate tra loro le varie parti di un piano dell'edificio (le due zone colorate in rosa rappresentano i vani scala, che non sono occupate né riscaldate).

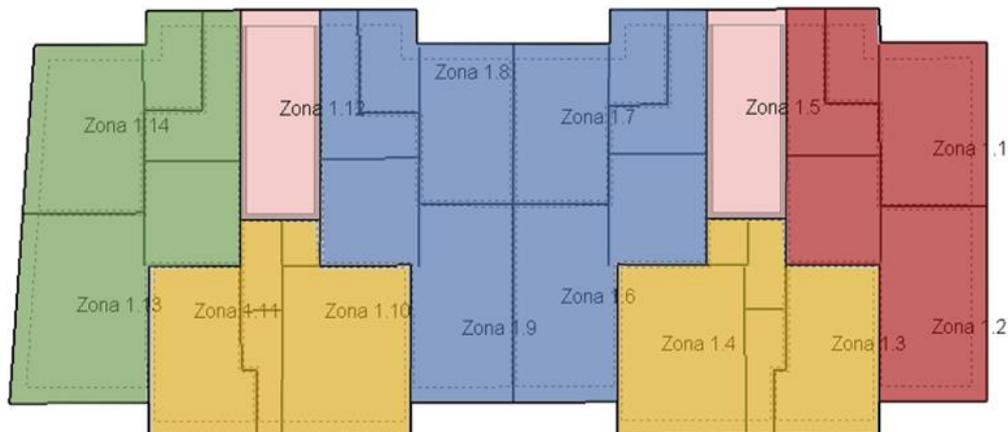


Figura 11 - Zonizzazione dell'edificio

Questa suddivisione è stata compiuta su tutti i piani, dopodiché per semplificare il calcolo sono state unite tra loro le zone adiacenti dei piani intermedi che si trovavano una sotto l'altra, non considerando quindi il primo piano che confina con la cantina e l'ultimo che confina con il sottotetto, le cui zone termiche sono state lasciate da soli e non inglobate alle altre.

Per quanto riguarda i ponti termici, questi sono stati caratterizzati in due modi diversi. I cassonetti delle tapparelle avvolgibili e i pilastri sono stati modellati con le rispettive stratigrafie, mentre per quanto riguarda i ponti termici dei serramenti e dei balconi si sono utilizzate le trasmittanze termiche lineiche, i cui valori sono stati determinati con l'ausilio di un abaco dei ponti termici. [13]

Il software permette anche di controllare attraverso un determinato moltiplicatore l'effettiva capacità termica dell'aria all'interno dell'ambiente, per simulare al meglio come l'intero edificio risponde alle varie sollecitazioni. Quando il valore del moltiplicatore è 1 viene considerata unicamente la capacità dell'aria umida contenuta in ambiente, ma il valore può essere diminuito o aumentato a seconda del caso in esame per tenere conto anche delle pareti o del mobilio interno.



Figura 12 - Moltiplicatore capacità di zona su DesignBuilder

Per stimare un valore appropriato del moltiplicatore si è proceduto ad un confronto tra la costante di tempo in modalità riscaldamento calcolata analiticamente mediante la normativa tecnica UNI/TS 11300-1 [7] e quella calcolata a partire dai dati di output forniti dalla simulazione dinamica, con vari valori del moltiplicatore.

Per il calcolo della costante di tempo τ si è ricorso alla seguente formula, secondo la normativa:

$$\tau = \frac{C_m/3600}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj}} \quad [h] \quad (4.1)$$

dove:

- C_m è la capacità termica interna dell'edificio (in J/K);
- $H_{tr,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione (in W/K);
- $H_{ve,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione (in W/K).

I valori determinati con il calcolo sono riassunti in tabella:

Grandezza	Valore
C_m (kJ/K)	552675
$H_{tr,adj}$ (W/K)	3845
$H_{ve,adj}$ (W/K)	621
τ (h)	34,4

Tabella 7 - Valori delle grandezze per il calcolo di τ

Sono poi stati testati quattro casi in Design Builder con diversi moltiplicatori di zona, per ognuno dei quali è stata determinata la rispettiva costante di tempo τ . Essa è stata determinata studiando il decadimento della temperatura interna, a partire dalla temperatura iniziale di 20 °C, in assenza di sorgenti di calore interne, solari o derivanti dall'impianto di riscaldamento. Sono stati raccolti i dati orari della temperatura per un periodo di tempo di 8 ore e si è ricavata τ a partire dall'equazione del decadimento esponenziale:

$$\frac{T_i - T_{eq}}{T_{i,0} - T_{eq}} = e^{-t/\tau} \quad [-] \quad (4.2)$$

dove:

- T_i è la temperatura interna all'istante di tempo t (in °C);
- T_{eq} è la temperatura di equilibrio, pari in questo caso alla temperatura esterna (fissata a 0 °C), data l'assenza di sorgenti di calore (in °C);
- $T_{i,0}$ è la temperatura interna iniziale (in questo caso 20 °C);
- t è l'istante di tempo (in h).

I risultati ottenuti sono riassunti in tabella:

Moltiplicatore	Temperatura finale dopo 8 ore (°C)	τ (h)
1	15,69	31,8
5	15,89	33,6
7	16,04	35,0
10	16,17	36,3

Tabella 8 - Valori di τ per diversi moltiplicatori

In figura invece sono mostrate le curve di decadimento:

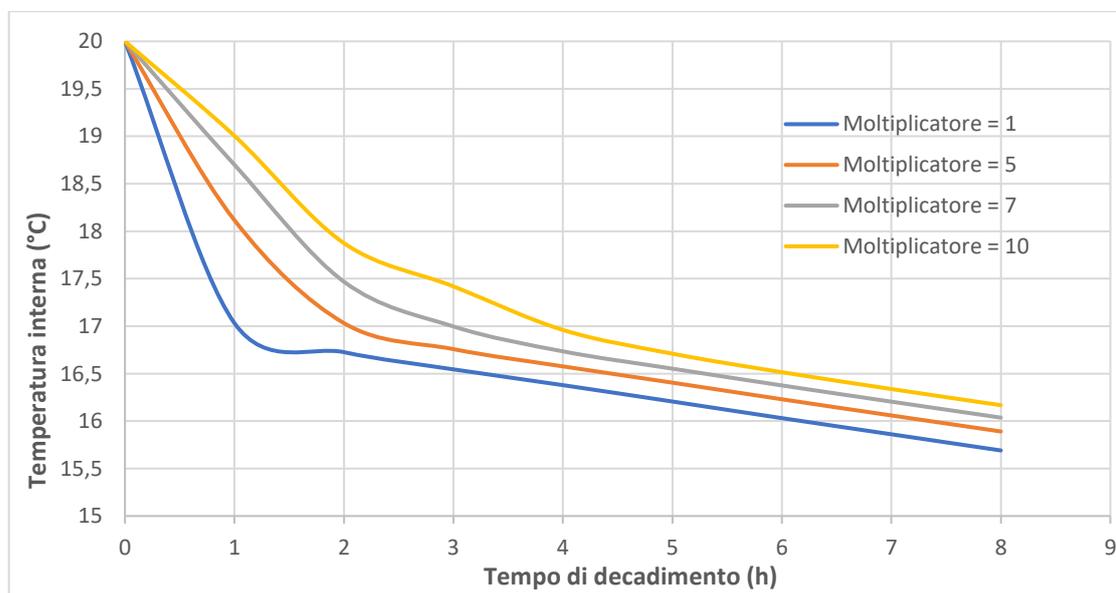


Figura 13 - Curve di decadimento per diversi moltiplicatori

Poiché il valore di τ ricavato analiticamente si colloca tra quelli relativi al moltiplicatore della capacità di zona pari a 5 e a 7, è stato scelto 6 per la simulazione del fabbisogno dell'edificio.

Una volta caratterizzato interamente l'edificio su Design Builder, si è proceduto alla simulazione per il calcolo del fabbisogno.

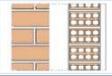
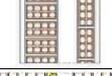
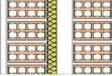
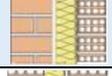
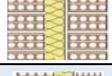
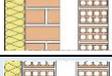
3.2. Varianti

Gli altri 61 edifici del campione sono varianti di quello precedentemente descritto, e hanno caratteristiche costruttive e geometriche differenti, al fine di rendere la popolazione il più varia possibile.

Varianti di tipo costruttivo

Sono state modellate varie tipologie di pareti verticali, solai inferiori e superiori, coperture e serramenti. Nello scegliere le varie stratigrafie si è fatto riferimento nuovamente a quelle contenute all'interno del database di TABULA [12]. Vengono riportati di seguito i componenti d'involucro accompagnati da un'immagine della stratigrafia e dal valore della trasmittanza termica. In appendice invece si possono trovare per ogni componente i dettagli della stratigrafia con l'elenco di tutti i materiali che la compongono.

Per quanto riguarda le pareti, sono state modellate 21 tipologie differenti, le cui caratteristiche principali vengono riportate di seguito.

Numero parete	Descrizione	Immagine	Trasmittanza [W/ (m ² K)]
1	Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati (45 cm)		1,271
2	Muratura a cassa vuota con mattoni forati (40 cm)		1,096
3	Muratura a cassa vuota con mattoni forati (30 cm)		1,155
4	Muratura a cassa vuota con mattoni forati, basso livello di isolamento (40 cm)		0,767
5	Muratura in calcestruzzo, basso livello di isolamento (30 cm)		0,790
6	Muratura in calcestruzzo (30 cm)		2,802
7	Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati, isolamento con insufflaggio (45 cm)		0,290
8	Muratura a cassa vuota con mattoni forati, isolamento con insufflaggio (40 cm)		0,309
9	Muratura a cassa vuota con mattoni forati, isolamento con insufflaggio (30 cm)		0,457
10	Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati (45 cm), cappotto esterno (7 cm)		0,394
11	Muratura a cassa vuota con mattoni forati (40 cm), cappotto esterno (7 cm)		0,376

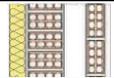
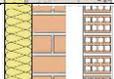
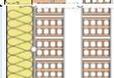
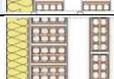
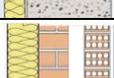
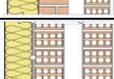
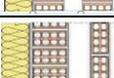
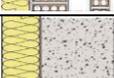
12	Muratura a cassa vuota con mattoni forati (30 cm), cappotto esterno (7 cm)		0,382
13	Muratura in calcestruzzo (30 cm), cappotto esterno (7 cm)		0,475
14	Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati (45 cm), cappotto esterno (12 cm)		0,264
15	Muratura a cassa vuota con mattoni forati (40 cm), cappotto esterno (12 cm)		0,256
16	Muratura a cassa vuota con mattoni forati (30 cm), cappotto esterno (12 cm)		0,259
17	Muratura in calcestruzzo (30 cm), cappotto esterno (12 cm)		0,298
18	Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati (45 cm), cappotto esterno (18 cm)		0,189
19	Muratura a cassa vuota con mattoni forati (40 cm), cappotto esterno (18 cm)		0,185
20	Muratura a cassa vuota con mattoni forati (30 cm), cappotto esterno (18 cm)		0,186
21	Muratura in calcestruzzo (30 cm), cappotto esterno (18 cm)		0,206

Tabella 9 - Tipologie di pareti opache per le varianti

Poiché ai fini dell'equazione il parametro di cui si tiene conto per le pareti è U_{op}^* e non la trasmittanza termica della stratigrafia, si riportano di seguito i valori delle trasmittanze termiche lineiche dei ponti termici relativi ai balconi e ai serramenti ricavate per gruppi di isolamento termico (per i cassonetti delle tapparelle avvolgibili si fa per tutti riferimento ad un valore di trasmittanza pari a $5,035 \text{ W/m}^2\text{K}$, a parte nei casi in cui l'isolamento della parete è di 12 o 18 cm, nel qual caso si considera una trasmittanza di $1,054 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Numero parete	U_{op} [W/ (m ² K)]	Trasmittanza termica lineica giunto parete-balcone [W/ (m K)]	Trasmittanza termica lineica parete-serramento [W/ (m K)]	U_{op}^* [W/ (m ² K)]
1	1,271	0,45	0,15	1,637
2	1,096	0,45	0,15	1,490
3	1,155	0,45	0,15	1,568
4	0,767	0,45	0,15	1,194
5	0,790	0,45	0,15	1,240
6	2,802	0	0	2,903
7	0,290	0,84	0,01	0,751
8	0,309	0,84	0,01	0,778

9	0,457	0,84	0,01	0,937
10	0,394	0,74	0,36	0,942
11	0,376	0,74	0,36	0,926
12	0,382	0,74	0,36	0,933
13	0,475	0,74	0,36	1,016
14	0,264	0,76	0,44	0,701
15	0,256	0,76	0,44	0,694
16	0,259	0,76	0,44	0,697
17	0,298	0,76	0,44	0,732
18	0,189	0,73	0,48	0,642
19	0,185	0,73	0,48	0,639
20	0,186	0,73	0,48	0,640
21	0,206	0,73	0,48	0,658

Tabella 10 - Ponti termici e trasmittanze corrette delle pareti opache

Le tipologie di copertura studiate sono invece otto, le prime quattro fanno riferimento ad una copertura piana, tipiche di un solaio che divide i piani riscaldati di un edificio dal sottotetto non riscaldato, mentre le altre quattro sono proprie di un tetto a falde, nel caso di sottotetto riscaldato.

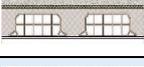
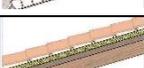
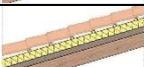
Numero copertura	Descrizione	Immagine	Trasmittanza [W/ (m ² K)]
1	Solaio latero-cementizio		1,617
2	Solaio latero-cementizio, basso livello di isolamento		0,982
3	Solaio latero-cementizio, medio livello di isolamento		0,422
4	Solaio latero-cementizio, alto livello di isolamento		0,276
5	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, basso livello di isolamento		0,932
6	Tetto a falde in laterizio, basso livello di isolamento		1,113
7	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, medio livello di isolamento		0,464
8	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, alto livello di isolamento		0,294

Tabella 11 - Tipologie di copertura per le varianti

Per quanto riguarda il solaio inferiore, le tipologie considerate sono quattro.

Numero copertura	Descrizione	Immagine	Trasmittanza [W/ (m ² K)]
1	Solaio latero-cementizio		1,300
2	Solaio latero-cementizio, basso livello di isolamento		0,981
3	Solaio latero-cementizio, medio livello di isolamento		0,413
4	Solaio latero-cementizio, alto livello di isolamento		0,272

Tabella 12 - Tipologie di solai inferiori per le varianti

Infine, i serramenti che sono stati modellati sono contenuti nella tabella seguente.

Tipologia di vetro	Trasmittanza termica vetro (W/ (m ² K))	Tipologia di telaio	Trasmittanza termica telaio (W/ (m ² K))	Trasmittanza termica finestra (W/ (m ² K))	Coefficiente di trasmissione solare (-)
Singolo (6 mm)	5,78	Legno (6 cm)	2,06	5,04	0,819
Singolo (6 mm)	5,78	Metallo (5 cm)	5,88	5,80	0,819
Doppio (3-6-3 mm)	3,16	Legno (6 cm)	2,06	2,94	0,762
Doppio basso-emissivo (3-6-3 mm)	2,25	Legno (6 cm)	2,06	2,21	0,697
Triplo basso-emissivo (3-13-3-13-3 mm)	1,25	Legno (6 cm)	2,06	1,41	0,461

Tabella 13 - Tipologie di serramenti per le varianti

Varianti di tipo geometrico

Per rappresentare una variabilità geometrica, dal punto di vista energetico non si bada tanto alla forma, quanto piuttosto al rapporto S/V, che esprime un'indicazione di quanto la superficie esterna dell'edificio disperda calore in relazione al volume interno di aria che dev'essere riscaldato. Generalmente, valori più alti di questo rapporto portano a consumi energetici maggiori, a parità di altre condizioni.

Attraverso modifiche dell'edificio-tipo, come l'aumento o la diminuzione di piani, o la presenza di una o due facciate adiabatiche, si è potuto estendere lo studio su condomini

che avevano valori di S/V compresi tra 0,36 e 0,55 m^{-1} , che è un range tipico per questo tipo di edifici.

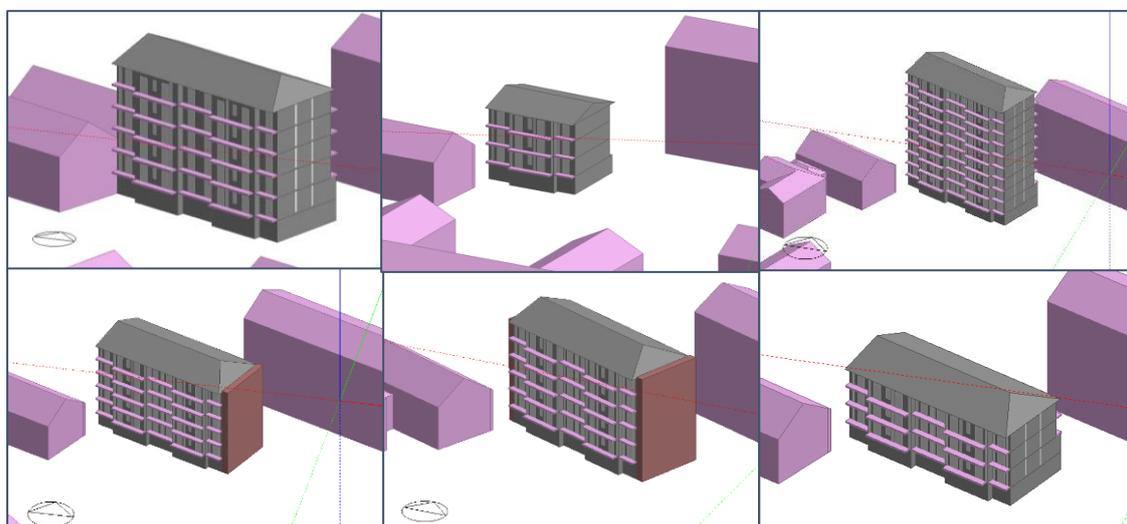


Figura 14 - Schermate di differenti varianti geometriche

Un'altra caratteristica geometrica che si è voluta variare per aumentare la variabilità è il cosiddetto window-to-wall ratio (WWR). Questo rapporto esprime le proporzioni che intercorrono tra le superfici vetrate e quelle opache verticali. Poiché i due componenti si comportano in maniera differente, soprattutto per quanto riguarda l'apporto solare in ambiente, è bene avere all'interno del campione condomini con WWR differenti: i valori che sono stati provati vanno da un minimo dell'11% ad un massimo del 29%.

Nella tabella che compare nella pagina successiva vengono specificate per ogni edificio del campione le sue principali caratteristiche geometriche e costruttive.

Edificio	Numero facciate libere	Numero di piani	Rapporto S/V	Window-to-wall ratio	Stratigrafia pareti	Sottotetto riscaldato	Stratigrafia copertura	Attacco a terra	Stratigrafia solaio inferiore	Tipo di serramento	Colore pareti
1	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
2	4	5	0,481	19,7%	2	No	1	Rialzato	1	1	Medio
3	4	5	0,481	19,7%	3	No	1	Rialzato	1	1	Medio
4	4	5	0,481	19,7%	4	No	1	Rialzato	1	1	Medio
5	4	5	0,481	19,7%	5	No	1	Rialzato	1	1	Medio
6	4	5	0,481	19,7%	6	No	1	Rialzato	1	1	Medio
7	4	5	0,481	19,7%	7	No	1	Rialzato	1	1	Medio
8	4	5	0,481	19,7%	8	No	1	Rialzato	1	1	Medio
9	4	5	0,481	19,7%	9	No	1	Rialzato	1	1	Medio
10	4	5	0,481	19,7%	10	No	1	Rialzato	1	1	Medio
11	4	5	0,481	19,7%	11	No	1	Rialzato	1	1	Medio
12	4	5	0,481	19,7%	12	No	1	Rialzato	1	1	Medio
13	4	5	0,481	19,7%	13	No	1	Rialzato	1	1	Medio
14	4	5	0,481	19,7%	14	No	1	Rialzato	1	1	Medio
15	4	5	0,481	19,7%	15	No	1	Rialzato	1	1	Medio
16	4	5	0,481	19,7%	16	No	1	Rialzato	1	1	Medio
17	4	5	0,481	19,7%	17	No	1	Rialzato	1	1	Medio
18	4	5	0,481	19,7%	1	No	2	Rialzato	1	1	Medio
19	4	5	0,481	19,7%	1	No	3	Rialzato	1	1	Medio
20	4	5	0,481	19,7%	14	No	4	Rialzato	1	1	Medio
21	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	2	1	Medio

22	4	5	0,481	19,7%	10	No	3	Rialzato	3	1	Medio
23	4	5	0,481	19,7%	14	No	4	Rialzato	4	1	Medio
24	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Pilotis	1	1	Medio
25	4	5	0,481	19,7%	7	No	1	Pilotis	2	1	Medio
26	4	5	0,481	19,7%	10	No	3	Pilotis	3	1	Medio
27	4	5	0,481	19,7%	14	No	4	Pilotis	4	1	Medio
28	4	6	0,460	18,4%	1	Sì	5	Rialzato	1	1	Medio
29	4	6	0,460	18,4%	1	Sì	6	Rialzato	1	1	Medio
30	4	6	0,460	18,4%	1	Sì	7	Rialzato	1	1	Medio
31	4	6	0,460	18,4%	1	Sì	8	Rialzato	1	1	Medio
32	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	2	Medio
33	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	3	Medio
34	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	4	Medio
35	4	5	0,481	19,7%	14	No	4	Rialzato	4	5	Medio
36	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	1	Chiaro
37	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	1	Scuro
38	4	5	0,481	19,7%	18	No	4	Rialzato	4	5	Medio
39	4	5	0,481	19,7%	19	No	4	Rialzato	4	5	Medio
40	4	5	0,481	19,7%	20	No	4	Rialzato	4	5	Medio
41	4	5	0,481	19,7%	21	No	4	Rialzato	4	5	Medio
42	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	2	Medio
43	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	3	Medio
44	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	4	Medio

45	4	5	0,481	19,7%	1	No	1	Rialzato	1	5	Medio
46	4	5	0,481	19,7%	14	No	4	Rialzato	4	5	Scuro
47	4	6	0,462	19,8%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
48	4	7	0,449	19,9%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
49	4	8	0,438	19,9%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
50	4	4	0,509	19,6%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
51	3	5	0,445	24,0%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
52	2	5	0,410	29,8%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
53	4	3	0,554	19,6%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
54	4	9	0,430	20,0%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
55	2	9	0,360	29,2%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
56	3	9	0,395	23,7%	1	No	1	Rialzato	1	1	Medio
57	4	5	0,481	23,4%	1	No	1	Rialzato	1	5	Medio
58	4	5	0,481	11,5%	1	No	1	Rialzato	1	5	Medio
59	4	5	0,481	19,7%	18	No	4	Rialzato	4	5	Scuro
60	4	5	0,481	19,7%	18	No	4	Rialzato	4	5	Chiaro
61	4	9	0,430	19,9%	18	No	4	Rialzato	4	1	Medio
62	4	5	0,481	19,7%	14	No	4	Rialzato	4	1	Medio

Tabella 14 - Principali caratteristiche fisico-geometriche degli edifici del campione

Nella tabella successiva sono riassunti i valori dei parametri che compaiono nelle variabili x, per tutti i 62 edifici:

Edificio	A_{netta}	U_{op}^*	A_{op}	U_W	A_W	b_r	U_r	A_r	b_f	U_f	A_f	g_{gl}	α
1	1214.72	1.637	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
2	1232.70	1.490	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
3	1269.08	1.568	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
4	1232.70	1.194	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
5	1269.08	1.240	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
6	1269.08	2.903	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
7	1214.72	0.751	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
8	1232.70	0.778	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
9	1269.08	0.937	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
10	1189.76	0.942	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
11	1207.56	0.926	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
12	1243.56	0.933	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
13	1243.56	1.016	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
14	1172.09	0.701	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
15	1189.76	0.694	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
16	1225.49	0.697	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
17	1225.49	0.732	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
18	1214.72	1.637	1115.81	5.035	219.2	0.9	0.982	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
19	1214.72	1.637	1119.85	5.035	219.2	0.9	0.422	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
20	1172.09	0.701	1123.89	5.035	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6

21	1214.72	1.637	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	0.981	311.07	0.819	0.6
22	1189.76	0.942	1119.85	5.035	219.2	0.9	0.422	299.15	0,8	0.413	311.07	0.819	0.6
23	1172.09	0.701	1123.89	5.035	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.819	0.6
24	1214.72	1.637	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	1	1.391	311.07	0.819	0.6
25	1214.72	0.751	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	1	1.032	311.07	0.819	0.6
26	1189.76	0.942	1119.85	5.035	219.2	0.9	0.422	299.15	1	0.421	311.07	0.819	0.6
27	1172.09	0.701	1123.89	5.035	219.2	0.9	0.276	299.15	1	0.276	311.07	0.819	0.6
28	1539.90	1.614	1190.09	5.035	219.2	1	0.932	387.44	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
29	1539.90	1.614	1190.09	5.035	219.2	1	1.113	387.44	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
30	1539.90	1.614	1190.09	5.035	219.2	1	0.464	387.44	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
31	1539.90	1.614	1190.09	5.035	219.2	1	0.294	387.44	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
32	1214.72	1.637	1114.19	5.799	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
33	1214.72	1.637	1114.19	2.939	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.762	0.6
34	1214.72	1.637	1114.19	2.214	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.697	0.6
35	1172.09	0.399	1123.89	1.412	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.6
36	1214.72	1.637	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.3
37	1214.72	1.637	1114.19	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.9
38	1151.07	0.190	1123.89	1.412	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.6
39	1168.57	0.186	1123.89	1.412	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.6
40	1203.99	0.187	1123.89	1.412	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.6
41	1203.99	0.205	1123.89	1.412	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.6
42	1214.72	1.637	1114.19	2.939	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.828	0.6
43	1214.72	1.637	1114.19	2.325	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.273	0.6

44	1214.72	1.637	1114.19	2.544	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.497	0.6
45	1214.72	1.637	1114.19	4.989	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.506	0.6
46	1172.09	0.701	1123.89	1.412	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.9
47	1442.80	1.636	1332.41	5.036	263.52	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
48	1681.62	1.635	1550.62	5.036	307.84	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
49	1920.44	1.634	1768.84	5.036	352.16	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
50	965.17	1.640	895.98	5.035	174.88	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
51	1232.81	1.761	914.00	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
52	1250.95	1.880	735.55	5.035	219.2	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
53	732.81	1.643	667.76	5.033	130.56	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
54	2178.43	1.634	1987.05	5.036	396.48	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
55	2243.05	1.817	1357.27	5.036	396.48	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
56	2210.74	1.714	1672.61	5.036	396.48	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
57	1214.72	1.649	1080.33	5.105	253.06	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
58	1214.72	1.613	1195.40	4.851	137.996	0.9	1.617	299.15	0,8	1.300	311.07	0.819	0.6
59	1151.07	0.190	1123.89	1.412	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.9
60	1151.07	0.190	1123.89	1.412	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.3
61	2063.10	0.190	1996.75	1.412	396.48	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.6
62	1172.09	0.265	1123.89	1.412	219.2	0.9	0.276	299.15	0,8	0.272	311.07	0.461	0.6

Tabella 15 - Valori riassuntivi dei parametri fisico-geometrici degli edifici del campione

Di seguito viene riportata una tabella comprensiva dei valori assunti dalle variabili x e y, per gli edifici del campione.

Edificio	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	y
1	1,502	0,909	0,358	0,266	0,118	0,901	3,028	99,59
2	1,347	0,895	0,353	0,262	0,117	0,808	3,028	93,72
3	1,377	0,870	0,343	0,255	0,113	0,826	3,028	93,65
4	1,079	0,895	0,353	0,262	0,117	0,648	3,028	83,25
5	1,089	0,870	0,343	0,255	0,113	0,653	3,028	82,41
6	2,549	0,870	0,343	0,255	0,113	1,529	3,028	126,38
7	0,689	0,909	0,358	0,266	0,118	0,413	3,028	67,60
8	0,703	0,895	0,353	0,262	0,117	0,422	3,028	67,72
9	0,822	0,870	0,343	0,255	0,113	0,493	3,028	71,69
10	0,882	0,928	0,366	0,272	0,121	0,529	3,028	81,41
11	0,855	0,914	0,361	0,268	0,119	0,513	3,028	79,56
12	0,836	0,888	0,350	0,260	0,116	0,501	3,028	77,48
13	0,911	0,888	0,350	0,260	0,116	0,546	3,028	80,18
14	0,666	0,942	0,371	0,276	0,123	0,400	3,028	74,88
15	0,650	0,928	0,366	0,272	0,121	0,390	3,028	73,57
16	0,633	0,901	0,355	0,264	0,117	0,380	3,028	71,50
17	0,665	0,901	0,355	0,264	0,117	0,399	3,028	72,55
18	1,504	0,909	0,218	0,266	0,118	0,902	3,028	96,06
19	1,510	0,909	0,094	0,266	0,118	0,906	3,028	92,54
20	0,672	0,942	0,063	0,276	0,123	0,403	3,028	64,42
21	1,502	0,909	0,358	0,201	0,118	0,901	3,030	99,02
22	0,886	0,928	0,095	0,086	0,121	0,532	3,020	71,06
23	0,672	0,942	0,063	0,058	0,123	0,403	3,010	61,59
24	1,502	0,909	0,358	0,356	0,118	0,901	3,028	109,33
25	0,689	0,909	0,358	0,264	0,118	0,413	3,030	72,02
26	0,886	0,928	0,095	0,110	0,121	0,532	3,020	72,57
27	0,672	0,942	0,063	0,073	0,123	0,403	3,010	61,98
28	1,247	0,717	0,234	0,210	0,093	0,748	2,732	80,50
29	1,247	0,717	0,280	0,210	0,093	0,748	2,710	81,58
30	1,247	0,717	0,117	0,210	0,093	0,748	2,730	76,49
31	1,247	0,717	0,074	0,210	0,093	0,748	2,724	74,19
32	1,502	1,046	0,358	0,266	0,118	0,901	3,028	101,20

33	1,502	0,530	0,358	0,266	0,110	0,901	3,028	92,44
34	1,502	0,400	0,358	0,266	0,101	0,901	3,028	89,23
35	0,383	0,264	0,063	0,058	0,069	0,230	3,010	31,54
36	1,502	0,909	0,358	0,266	0,118	0,451	3,028	104,46
37	1,502	0,909	0,358	0,266	0,118	1,352	3,028	95,22
38	0,185	0,269	0,065	0,059	0,070	0,111	3,010	20,25
39	0,179	0,265	0,064	0,058	0,069	0,107	3,010	20,08
40	0,175	0,257	0,062	0,056	0,067	0,105	3,010	19,84
41	0,192	0,257	0,062	0,056	0,067	0,115	3,010	20,26
42	1,502	0,530	0,358	0,266	0,120	0,901	3,028	90,77
43	1,502	0,420	0,358	0,266	0,039	0,901	3,028	101,85
44	1,502	0,459	0,358	0,266	0,072	0,901	3,028	97,09
45	1,502	0,900	0,358	0,266	0,073	0,901	3,028	108,73
46	0,672	0,264	0,063	0,058	0,069	0,605	3,010	47,30
47	1,511	0,920	0,302	0,224	0,120	0,906	3,023	97,74
48	1,508	0,922	0,259	0,192	0,120	0,905	3,020	95,80
49	1,505	0,924	0,227	0,168	0,120	0,903	3,018	94,37
50	1,522	0,912	0,451	0,335	0,119	0,913	3,035	104,63
51	1,306	0,895	0,353	0,262	0,117	0,783	3,028	90,95
52	1,106	0,882	0,348	0,259	0,115	0,663	3,028	82,12
53	1,497	0,897	0,594	0,441	0,117	0,898	3,047	110,80
54	1,490	0,917	0,200	0,149	0,119	0,894	3,016	92,45
55	1,100	0,890	0,194	0,144	0,116	0,660	3,016	74,91
56	1,297	0,903	0,197	0,146	0,118	0,778	3,016	83,74
57	1,466	1,063	0,358	0,266	0,140	0,880	3,028	99,53
58	1,587	0,551	0,358	0,266	0,070	0,952	3,028	100,06
59	0,185	0,269	0,065	0,059	0,070	0,167	3,010	19,68
60	0,185	0,269	0,065	0,059	0,070	0,056	3,010	20,85
61	0,183	0,271	0,036	0,033	0,071	0,110	3,006	17,34
62	0,254	0,264	0,063	0,058	0,069	0,152	3,010	23,35

Tabella 16 - Valori delle variabili di input per gli edifici del campione

Da una prima osservazione dei dati raccolti, si possono ritrovare alcune considerazioni teoriche fatte precedentemente.

Per esempio, considerando gli edifici dall'1 al 17, si può notare come questi differiscano solo nella tipologia delle pareti verticali. Nel grafico seguente viene ben evidenziata la dipendenza del fabbisogno dalla trasmittanza termica delle pareti (o meglio, da quella corretta per tenere in considerazione i ponti termici), come previsto dall'equazione lineare descritta nel capitolo 2.

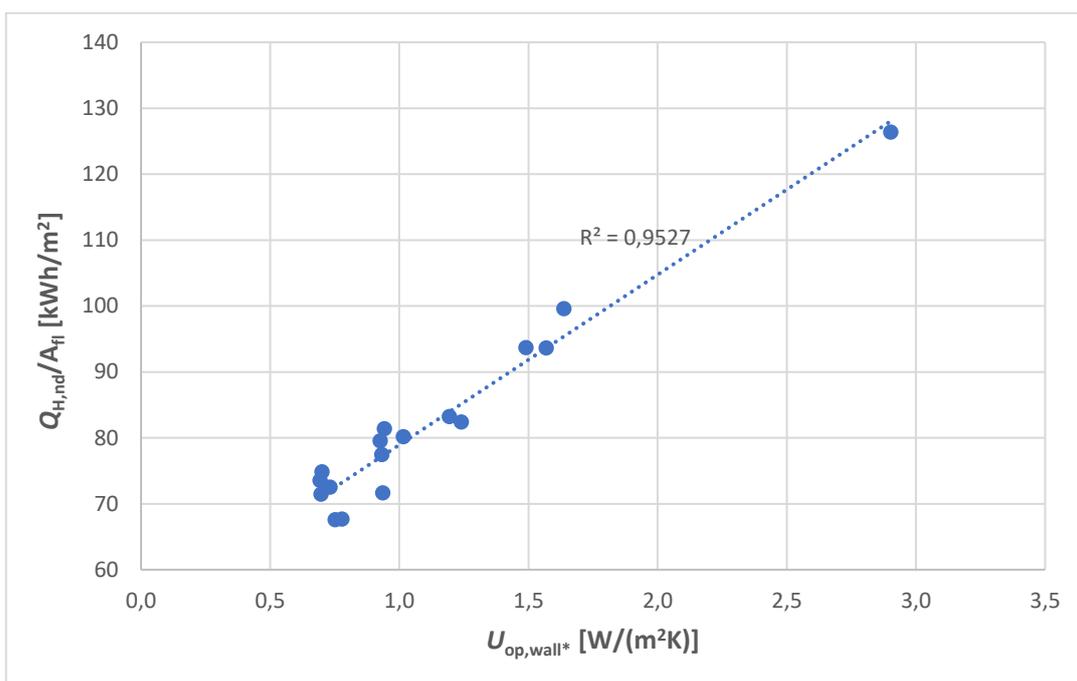


Figura 15 – Dipendenza del fabbisogno energetico dalla trasmittanza termica corretta

Se si considerano l'edificio 1 e quelli dal 47 al 56, si osserva che possiedono tutti le medesime tipologie costruttive per quanto riguarda le pareti opache, i serramenti, i solai inferiore e superiore; differiscono però per la geometria, e in particolare per il rapporto di forma S/V , che come detto precedentemente influenza il fabbisogno energetico. In particolare si può notare come il consumo energetico aumenti all'aumentare del rapporto di forma, in quanto a parità di volume riscaldato aumentano le superfici che disperdono il calore verso l'esterno.

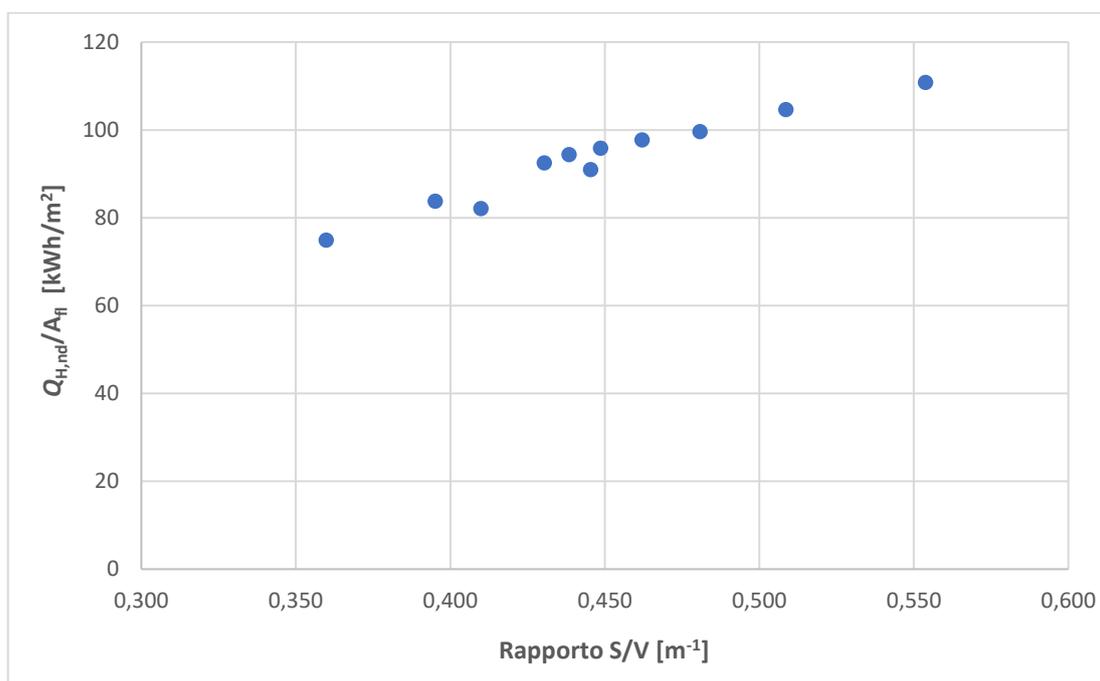


Figura 16 -Dipendenza del fabbisogno dal rapporto S/V

5. Risultati

5.1. Risultati dell'analisi statistica

Dopo aver ottenuto i valori del fabbisogno attraverso la simulazione dinamica si è proceduto con l'analisi di regressione.

I coefficienti determinati sono i seguenti:

- $A = 39,52$ [kh·K]
- $B = 35,87$ [kh·K]
- $C = 24,76$ [kh·K]
- $D = 36,81$ [kh·K]
- $E = -160,1$ [kWh/m²]
- $F = -6,371$ [kh·K]
- $G = 13,09$ [kWh/m³]
- $H = -24,87$ [kWh/m²]

I risultati dell'analisi statistica invece sono riportati in tabella:

Coefficiente di determinazione R^2 [-]	0,985
Errore standard [kWh/m ²]	3,52
Media campionaria [kWh/m ²]	76,74

Tabella 17 - Risultati dell'analisi statistica

Come si può osservare dal coefficiente di determinazione, che fornisce una misura di quanto i valori assunti dalla variabile y dipendano in maniera lineare da quelli assunti dalle variabili x_i , l'attendibilità del modello è elevata. Questo può essere visualizzato anche nel grafico seguente, che confronta i risultati del fabbisogno ottenuti mediante la simulazione dinamica con quelli che si avrebbero applicando l'equazione lineare:

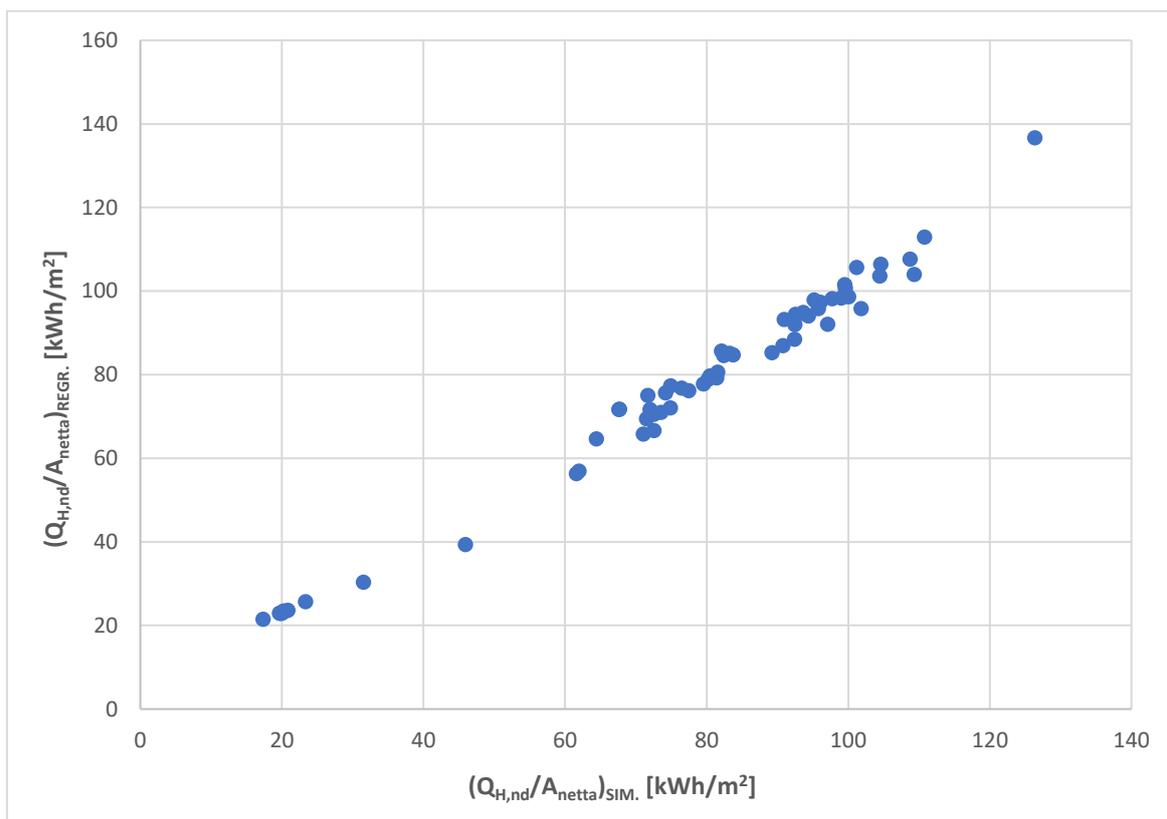


Figura 17 – Confronto grafico tra dati derivanti dalla simulazione e dati derivanti dalla retta di regressione

Di seguito vengono riportati per ogni edificio i dati mappati sopra, insieme alla devianza percentuale dei residui:

Edificio	Simulazione	Regressione	Devianza dei residui
1	99,59	100,71	1,13%
2	93,72	94,70	1,05%
3	93,65	94,87	1,30%
4	83,25	85,16	2,29%
5	82,41	84,59	2,64%
6	126,38	136,70	8,17%
7	67,60	71,69	6,05%
8	67,72	71,73	5,92%
9	71,69	75,07	4,71%
10	81,41	79,26	-2,64%
11	79,56	77,80	-2,21%
12	77,48	76,18	-1,67%
13	80,18	78,85	-1,66%

14	74,88	72,05	-3,79%
15	73,57	70,97	-3,54%
16	71,50	69,43	-2,90%
17	72,55	70,57	-2,74%
18	96,06	97,31	1,30%
19	92,54	94,43	2,04%
20	64,42	64,63	0,32%
21	99,02	98,33	-0,70%
22	71,06	65,79	-7,42%
23	61,59	56,36	-8,50%
24	109,33	104,02	-4,86%
25	72,02	71,65	-0,51%
26	72,57	66,66	-8,14%
27	61,98	56,93	-8,16%
28	80,50	79,73	-0,95%
29	81,58	80,58	-1,23%
30	76,49	76,79	0,39%
31	74,19	75,66	1,98%
32	101,20	105,66	4,41%
33	92,44	88,46	-4,30%
34	89,23	85,27	-4,43%
35	31,54	30,32	-3,89%
36	104,46	103,58	-0,84%
37	95,22	97,84	2,75%
38	20,25	23,30	15,06%
39	20,08	23,05	14,78%
40	19,84	22,84	15,13%
41	20,26	23,44	15,71%
42	90,77	86,94	-4,22%
43	101,85	95,79	-5,95%
44	97,09	92,03	-5,20%
45	108,73	107,65	-0,99%
46	45,93	39,35	-14,33%
47	97,74	98,18	0,46%
48	95,80	95,82	0,03%
49	94,37	94,05	-0,33%
50	104,63	106,41	1,70%
51	90,95	93,24	2,51%
52	82,12	85,63	4,28%
53	110,80	112,90	1,89%
54	92,45	91,98	-0,51%
55	74,91	77,34	3,25%
56	83,74	84,73	1,19%

57	99,53	101,57	2,05%
58	100,06	98,68	-1,38%
59	19,68	22,94	16,55%
60	20,85	23,65	13,44%
61	17,34	21,50	23,99%
62	23,35	25,72	10,15%

Tabella 18 – Devianza dei residui

Ciò che si evince è che gli scostamenti restano per la maggior parte degli edifici al di sotto del 10%. Le eccezioni si hanno in meno di una decina di casi, che sono quelli in cui l'isolamento è molto spinto (18 cm di cappottatura esterna): il fabbisogno stimato con la retta di regressione è maggiore di quello effettivo calcolato con la simulazione, e comunque a parte un caso estremo gli scostamenti restano sotto il 17%. La motivazione di tali anomalie nel caso di edifici molto isolati può essere trovata nel fatto che con valori di trasmittanza bassi si va a perdere un po' quella linearità che invece si ha nei casi di edifici meno coibentati, in quanto cominciano a intervenire in maniera più importante i fenomeni capacitivi di accumulo del calore.

5.2. Determinazione di fattori correttivi

Fattore di orientamento f_{OR}

Dopo aver eseguito l'analisi di regressione si è proceduto alla determinazione del parametro relativo all'orientamento f_{OR} . Il metodo utilizzato viene presentato qui di seguito.

Sono stati considerati 10 edifici appartenenti al campione, differenti tra loro dal punto di vista geometrico e costruttivo, e sono stati modellati tramite simulazione dinamica su Design Builder dopo averli ruotati di 90°. Per ognuno di essi si è poi ricavato il fattore f_{OR} come quel numero che rendesse verificata l'equazione:

$$y' = A \cdot x_1 + B \cdot x_2 + C \cdot x_3 + D \cdot x_4 + f_{OR} \cdot (E \cdot x_5 + F \cdot x_6) + G \cdot x_7 + H \quad (5.1)$$

[kWh/m²]

Nella quale y' corrisponde al fabbisogno calcolato mediante simulazione e le variabili x assumono determinati valori a seconda delle caratteristiche dell'edificio in esame.

Edificio	y' (kWh/m ²)	f_{OR}
1	107,06	0,743
2	100,74	0,746
5	89,34	0,787
10	88,67	0,585
34	95,49	0,533
36	111,79	0,624
37	102,76	0,821
57	107,50	0,803
58	105,25	0,593
62	27,38	0,862

Tabella 19 - Fattori di orientamento per i vari casi

Si noti che in tutti i casi il fattore è minore di 1, con valori che variano da un minimo di 0,53 a un massimo di 0,86, per cui il fabbisogno nel caso di orientamento nord-sud è maggiore di quello est-ovest, a parità di tutte le altre condizioni. Il valore univoco che si è scelto è quello che minimizza gli scarti percentuali tra i vari f_{OR} dei casi studiati, ed è risultato essere 0,728.

Fattori relativi alla località

I fattori f_{GG} e f_{IRR} sono stati ricavati concordemente a quanto spiegato nel capitolo 2.3, e sono stati eseguiti i calcoli su 5 diverse località, di interesse del committente.

I valori che assumono tali fattori per le varie località sono riassunti in tabella.

Località	f_{GG}	f_{IRR}
Torino	1	1
Parma	0,933	1,054
Genova	0,585	0,890
Piacenza	0,931	1,022
Reggio Emilia	0,950	0,930

Tabella 20 - Fattori di correzione relativi alla località

5.3. Implementazione dell'algoritmo

Al fine di rendere lo strumento utilizzabile da parte di un utente non esperto, e quindi per la sua implementazione sulla piattaforma, si sono rivelate necessarie una serie di semplificazioni e accorpamenti di parametri. Vengono mostrate di seguito come alcune variabili vengono calcolate e a quali altre sono legate.

In riferimento alle variabili geometriche, viene chiesto all'utente di inserire alcune informazioni di facile reperibilità, come l'area totale delle facciate, quella totale dei serramenti, la superficie lorda del piano tipo e la relativa altezza netta, oltre il numero di vani scala, mentre altre aree vengono calcolate direttamente dal tool.

L'area totale delle pareti opache verticali per esempio viene calcolata mediante la seguente formula:

$$A_{op} = \text{"Area totale delle facciate"} - \text{"Area superficie vetrata"} \quad [m^2] \quad (5.2)$$

Per quanto riguarda la superficie utile riscaldata di pavimento, invece, si procede nel seguente modo:

$$A_{netta} = f_n \cdot A_{lorda} \quad [m^2] \quad (5.3)$$

La formula (5.3) fa riferimento alla specifica tecnica UNI/TS 11300-1 [7], che calcola la superficie netta di pavimento a partire dal valore della superficie lorda. Quest'ultima viene determinata a partire dai dati inputati dall'utente:

$$A_{lorda} = \text{"Numero piani abitabili"} \cdot (\text{"Superficie lorda piano tipo"} - 12 \cdot \text{"Numero vani scala"}) \quad [m^2] \quad (5.4)$$

Il valore 12 (in m²) rappresenta una superficie caratteristica del vano scala in edifici residenziali pluri-familiari.

Il fattore f_n invece assume un determinato valore a seconda dello spessore delle pareti esterne, che è un dato inputato dall'utente. Si possono scegliere tre diversi range di spessore, ad ognuno dei quali viene fatto corrispondere un certo valore:

Spessore facciata	f_n
≥ 25 cm e < 35 cm	0,892
≥ 35 cm e < 45 cm	0,862
≥ 45 cm	0,839

Tabella 21 – Possibili valori per il fattore f_n

Anche la superficie del solaio inferiore viene calcolata direttamente dal tool, nella maniera seguente:

$$A_f = \text{"Superficie lorda piano tipo"} - 12 \cdot \text{"Numero vani scala"} \quad [m^2] \quad (5.5)$$

Discorso analogo si ha per la superficie della copertura, che viene calcolata mediante la seguente formula:

$$A_r = f_r \cdot A_f \quad [m^2] \quad (5.6)$$

Il fattore f_r assume un determinato valore a seconda della tipologia di copertura e della presenza o meno di sottotetto riscaldato.

Tipologia	Sottotetto	f_r
A falde	Riscaldato	1,2
A falde	Non riscaldato	1
Piano	Riscaldato	1
Piano	Non riscaldato	Scelta non possibile

Tabella 22 - Possibili valori per il fattore f_r

Sostanzialmente il fattore f_r serve ad aumentare del 20% l'area del solaio superiore quando è il tetto a falde a fare da superficie di separazione dell'ambiente riscaldato. Viene impedita la combinazione di tetto piano e sottotetto non riscaldato.

In riferimento alle variabili fisiche invece, queste vengono calcolate tutte direttamente dal tool, sulla base di altri dati di input dell'utente.

Stato di fatto

Il valore di trasmittanza termica corretta delle pareti U_{op}^* viene assegnata in base alle combinazioni che possono intercorrere tra lo spessore delle pareti, l'isolamento termico e la tipologia di chiusura oscurante per i serramenti. Quest'ultima influenza la determinazione di U_{op}^* in quanto si tiene conto del ponte termico relativo ai cassonetti delle tapparelle, se sono presenti. Viceversa se sono presenti ante o nessuna chiusura oscurante il ponte termico non viene considerato.

Si possono scegliere quattro possibili tipologie di isolamento termico: nessuna coibentazione, insufflaggio, 5÷10 cm di coibentazione e più 10 cm di coibentazione (queste ultime due fanno riferimento ad un cappotto esterno). Di seguito vengono mostrati graficamente i valori che U_{op}^* può assumere in funzione delle scelte effettuate nelle tre voci appena descritte.

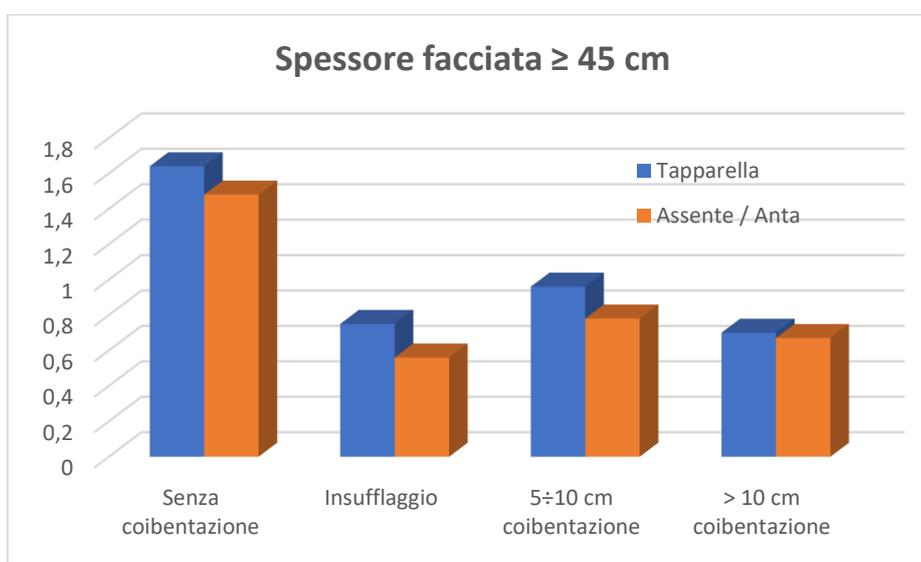
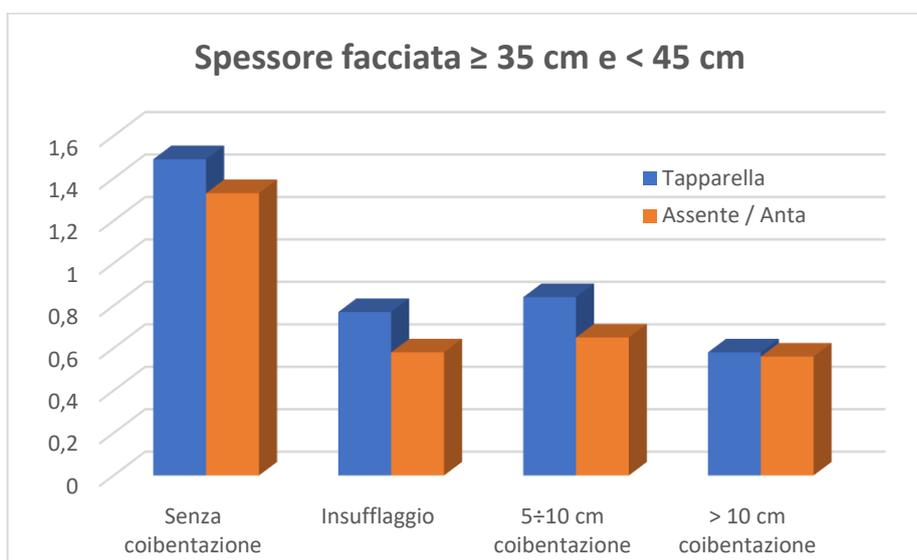
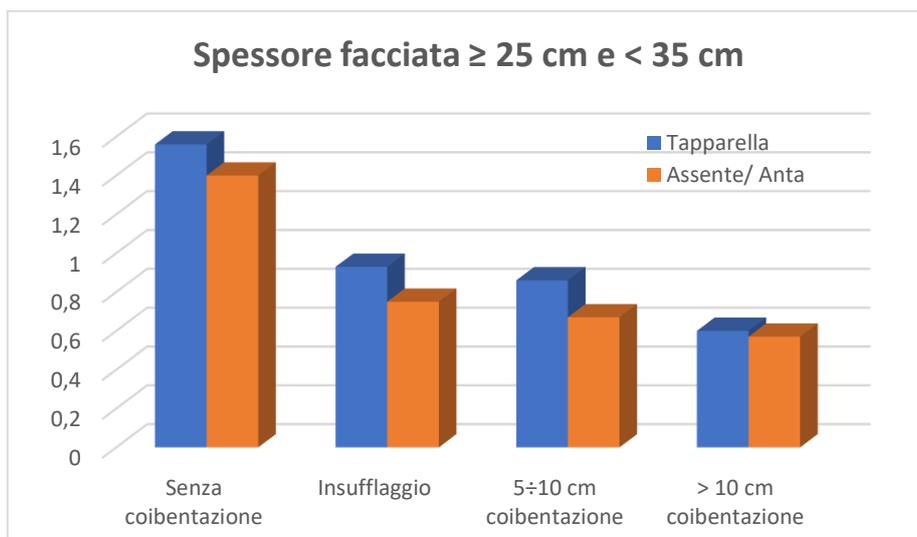


Figura 18 - Possibili valori per la trasmittanza corretta delle pareti nello stato di fatto

Per la determinazione di questi valori si è fatto riferimento ad alcune delle stratigrafie già usate per il campione di edifici presentato nel capitolo 4, e sono stati considerati i ponti termici relativi ai pilastri, ai balconi, ai serramenti e ai relativi cassonetti, con valori più precisi di trasmittanza termica lineica.

Il coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna opaca viene assegnato sulla base del tipo di colore delle pareti inputato dall'utente, come si può osservare nella tabella seguente:

Colore	α
Chiaro	0,3
Medio	0,6
Scuro	0,9

Tabella 23 - Possibili valori per il coefficiente di assorbimento

Il fattore di correzione per l'ambiente adiacente al solaio superiore viene calcolato a seconda della tipologia di copertura e della presenza o meno di sottotetto riscaldato.

Tipologia	Sottotetto	b_r
A falde	Riscaldato	1
A falde	Non riscaldato	0,9
Piano	Riscaldato	1
Piano	Non riscaldato	Scelta non possibile

Tabella 24 - Possibili valori per il fattore di correzione b_r

Sono possibili tre tipologie di isolamento: nessuna coibentazione, 5÷10 cm di coibentazione o più di 10 cm di coibentazione; a seconda della scelta viene assegnato un determinato valore di trasmittanza termica.

Isolamento	U_r
Senza coibentazione	1,62
5÷10 cm coibentazione	0,42
> 10 cm coibentazione	0,28

Tabella 25 - Possibili valori per la trasmittanza del solaio superiore nello stato di fatto

La tipologia di attacco a terra inputato dall'utente determina il valore del fattore di correzione per l'ambiente adiacente al solaio inferiore.

Tipologia	b_f
Pilotis	1
A raso	0,8
Rialzato	0,8

Tabella 26 - Possibili valori per il fattore di correzione b_f

Come per l'ultimo solaio, le tipologie di isolamento sono tre, ad ognuna delle quali viene fatto corrispondere un determinato valore di trasmittanza termica:

Coibentazione primo solaio	U_f
Senza coibentazione	1,30
5÷10 cm coibentazione	0,41
> 10 cm coibentazione	0,27

Tabella 27 - Possibili valori per la trasmittanza del solaio inferiore nello stato di fatto

Sia per il primo che per l'ultimo solaio si è fatto riferimento ad alcune delle stratigrafie già utilizzate negli edifici del campione per ciò che concerne i valori di trasmittanza termica.

Per quanto riguarda i serramenti, viene chiesto di inserire informazioni sul tipo di telaio e di vetro. Possono essere scelti quattro tipi di telaio (in legno, in metallo senza taglio termico, in metallo con taglio termico e in PVC), ma dal punto di vista energetico sono equivalenti tra loro, eccezion fatta per il metallo senza taglio termico. Sono invece tre le tipologie di vetro (singolo, doppio, doppio basso-emissivo).

La combinazione di telaio e vetro determina il valore della trasmittanza dei serramenti U_w , mentre solo il vetro influenza quello del fattore solare del vetro trasparente g_{gl} . I valori sono riportati in tabella:

Telaio	Vetro	U_w	g_{gl}
Legno	Singolo	5,03	0,82
Metallo senza taglio termico	Singolo	5,80	0,82
Legno	Doppio	2,94	0,77
PVC	Doppio	2,94	0,77
Metallo con taglio termico	Doppio	2,94	0,77
Legno	Doppio basso-emissivo	2,21	0,70
PVC	Doppio basso-emissivo	2,21	0,70
Metallo con taglio termico	Doppio basso-emissivo	2,21	0,70
Metallo con taglio termico	Singolo	Scelta non possibile	
PVC	Singolo	Scelta non possibile	
Metallo senza taglio termico	Doppio	Scelta non possibile	
Metallo senza taglio termico	Doppio basso-emissivo	Scelta non possibile	

Tabella 28 - Possibili valori per la trasmittanza e fattore solare del vetro nello stato di fatto

Anche qui, alcune combinazioni vengono impedito.

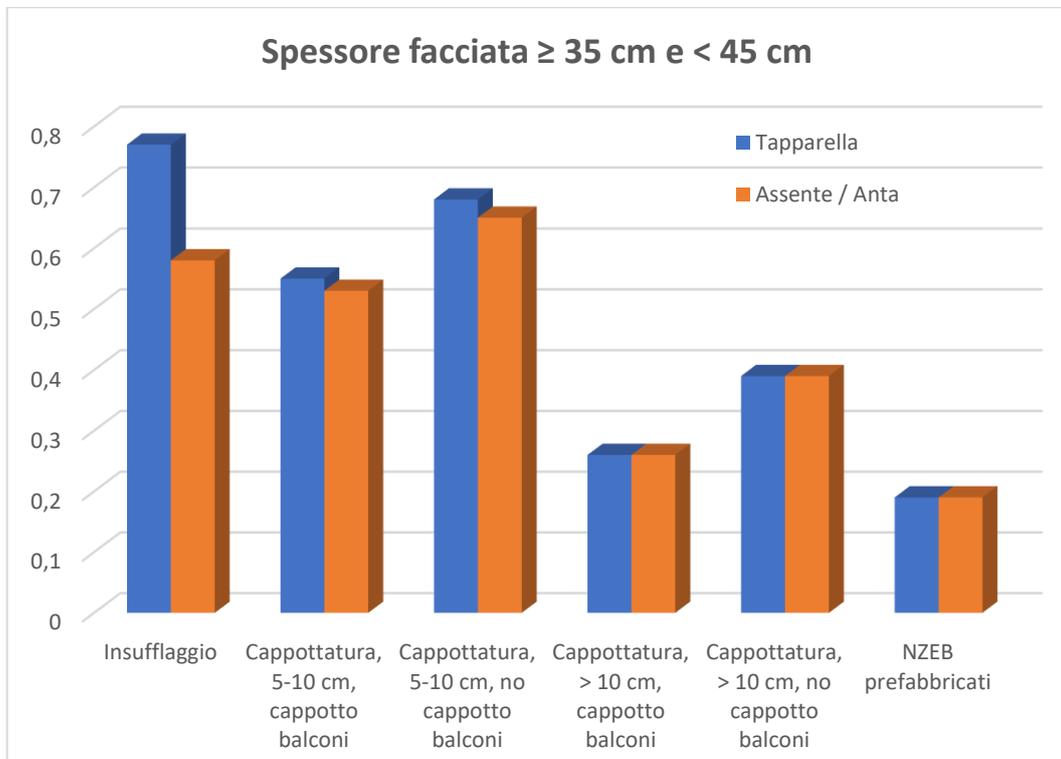
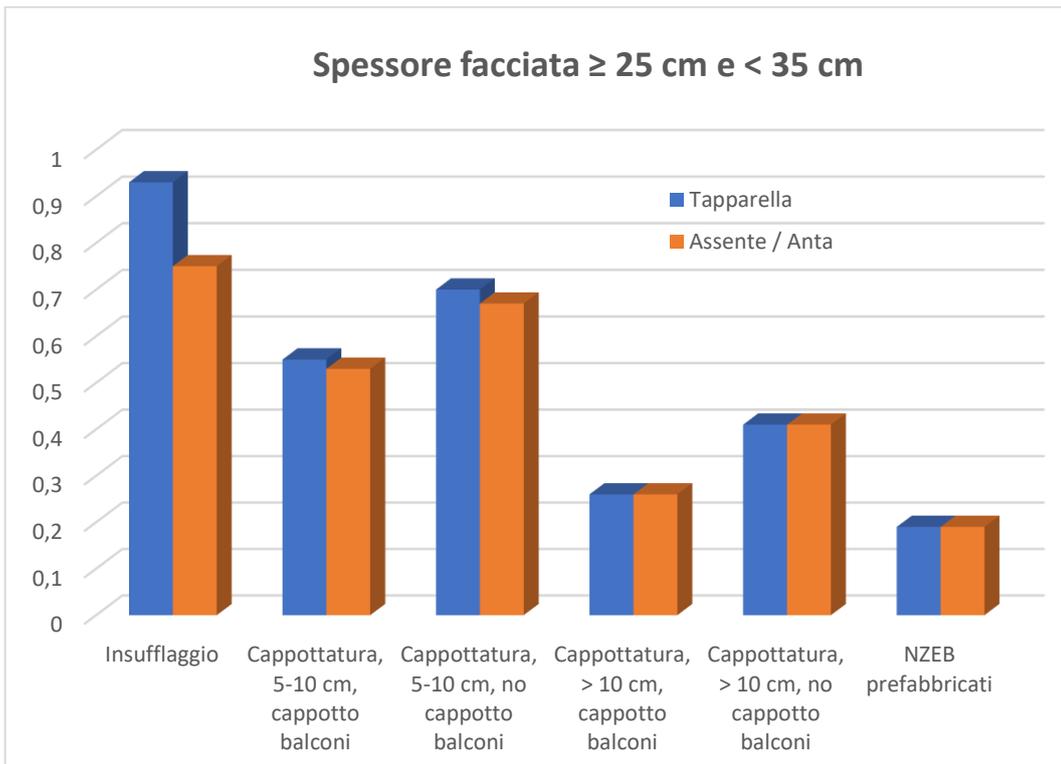
La parte vetrata dei serramenti viene calcolata come l'80% di quella totale.

Una volta inputati tutti i dati viene calcolata automaticamente la stima del consumo energetico nello stato di fatto.

Interventi

Per quanto riguarda la facciata, le tipologie di intervento ipotizzate sono l'insufflaggio, il cappotto esterno, la facciata ventilata e i cosiddetti moduli prefabbricati NZEB. Per il cappotto e la facciata ventilata è possibile scegliere tra due diversi spessori di isolante: 5÷10 cm e maggiore di 10 cm.

Se viene scelto l'intervento di coibentazione della facciata, viene associato un nuovo valore di trasmittanza termica corretta U_{op}^* , che dipenderà dallo spessore della parete nello stato di fatto e dalla presenza o meno di tapparelle, dalla tipologia di isolamento scelta e il relativo spessore, se richiesto, ma anche dall'eventuale cappottatura dei balconi.



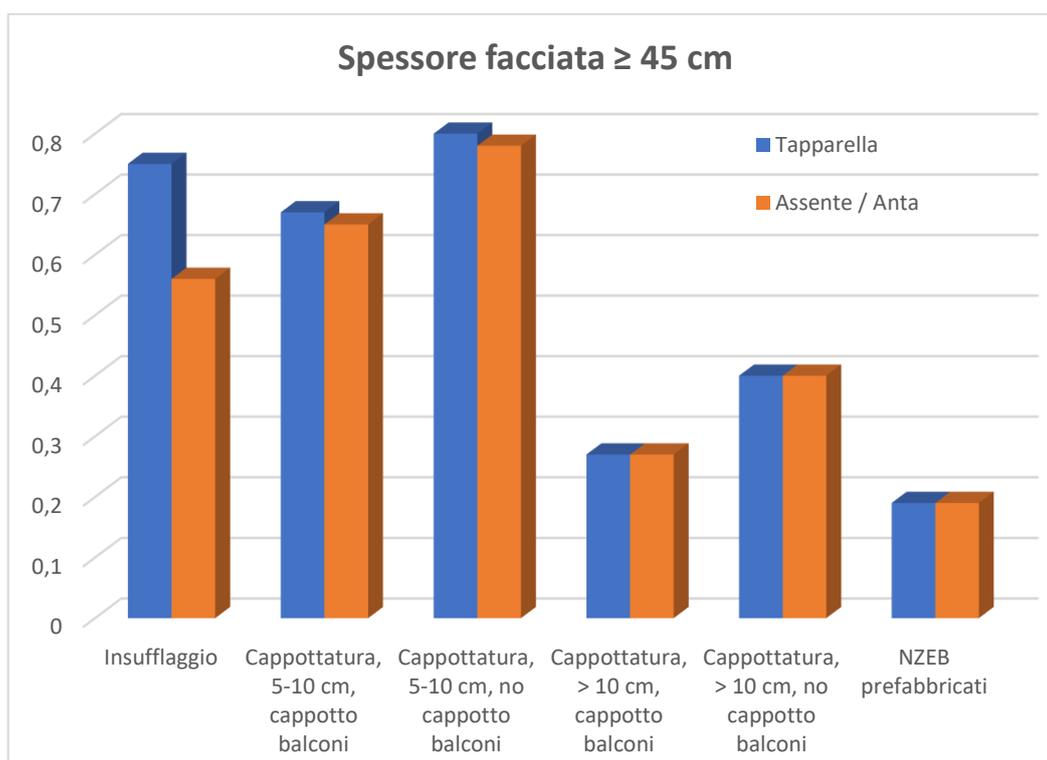


Figura 19 - Possibili valori di trasmittanza corretta delle pareti nella simulazione dell'intervento

Dal punto di vista energetico, la cappottatura e la facciata ventilata sono equivalenti, perciò le quattro colonne centrali nei grafici si riferiscono anche a questa tipologia di intervento. Vengono distinti i casi in cui si interviene sui balconi (nel caso di cappottatura o facciata ventilata), in quanto in questo caso il ponte termico relativo ai balconi non viene più considerato. Diversamente, se ne tiene conto, e quindi il valore di trasmittanza risulta più alto. Nel caso di NZEB non vengono considerati più i ponti termici.

Per quanto riguarda il primo solaio, si può decidere se coibentare e quale spessore di isolante adottare. Contestualmente alla scelta, viene assegnato un determinato valore alla trasmittanza termica U_f .

Spessore coibente	U_f
5÷10 cm coibentazione	0,41
> 10 cm coibentazione	0,27

Tabella 29 - Possibili valori di trasmittanza del solaio inferiore nella simulazione dell'intervento

Successivamente si ha la coibentazione dell'ultimo solaio; anche qui in base allo spessore dell'isolante viene assegnata una determinata U_r .

Spessore coibente	U_r
5÷10 cm coibentazione	0,42
> 10 cm coibentazione	0,28

Tabella 30 - Possibili valori di trasmittanza del solaio superiore nella simulazione dell'intervento

Infine si può decidere di sostituire i serramenti; viene richiesto di inserire la tipologia di telaio (metallo con taglio termico o PVC) e quella del vetro (doppio basso-emissivo o triplo basso-emissivo). Anche in questo caso vengono assegnati determinati valori di trasmittanza termica e del fattore solare del vetro, in base alle scelte effettuate.

Vetro nuovi serramenti	U_w	g_{gl}
Doppio basso-emissivo	2,21	0,70
Triplo basso-emissivo	1,41	0,46

Tabella 31 - Possibili valori di trasmittanza e fattore solare dei serramenti nella simulazione dell'intervento

Terminate le scelte relative all'intervento il tool calcola il consumo energetico che si avrebbe con l'intervento, senza modificare tutti gli altri parametri geometrici e relativi al sito, che erano stati determinati per lo stato di fatto. Accanto ai risultati energetici vengono forniti anche quelli economici, che permettono di poter stimare la convenienza o meno dell'intervento proposto.

A titolo di esempio illustrativo, vengono mostrate un paio di schermate dell'interfaccia del sito web sviluppato, in cui viene chiesto di riempire le caselle bianche con il numero relativo alla richiesta affianco oppure di selezionare una voce nel menu a tendina.

Inserimento dati edificio

Epoca di costruzione	<input type="text" value="Seleziona"/>		Numero di facciate	<input type="text"/>	
Superficie lorda del piano tipo	<input type="text"/>	m ²	Area totale delle facciate	<input type="text"/>	m ²
Numero piani abitabili	<input type="text"/>		Area superficie vetrata	<input type="text"/>	m ²
Altezza netta del piano tipo	<input type="text"/>	m			
Numero vani scala	<input type="text"/>				

Figura 20 - Schermata del sito - dati principali dell'edificio

Facciate

Spessore facciata	<input type="text" value="Seleziona"/>	cm
Colore	<input type="text" value="Seleziona"/>	
Finitura	<input type="text" value="Seleziona"/>	
Stato di conservazione	<input type="text" value="Seleziona"/>	
Isolamento termico	<input type="text" value="Seleziona"/>	

Figura 21 - Schermata del sito - facciate

6. Validazione del modello

Per testare l'efficacia dell'algoritmo sono state condotte due prove su due diversi edifici, e sono stati confrontati i risultati ottenuti mediante una simulazione dinamica con quelli avuti applicando l'algoritmo di calcolo.

6.1. Test di validazione 1

Il primo edificio su cui si è eseguito il test è un condominio ubicato in Pianezza, di cui di seguito si riporta un'immagine.



Figura 22 - Veduta esterna dell'edificio del test di validazione 1

Di seguito vengono riportati i dati principali:

	Edificio nello stato di fatto	
	Localizzazione	Torino
	Orientamento principale	Nord-Sud
DATI GEOMETRICI	Superficie lorda del piano tipo	600 m ²
	Numero di piani abitabili	5
	Altezza netta del piano tipo	3 m
	Numero di vani scala	2
	Area totale delle facciate	1740 m ²
	WWR	14%
DATI COSTRUTTIVI	Parete esterna	5-10 cm di coibentazione
	Spessore parete	25-30 cm (30 cm)
	Colore parete esterna	Medio
	Serramenti	Vetro doppio, telaio in legno
	Copertura/solaio superiore	A falde, sottotetto non riscaldato, solaio senza coibentazione
	Tipo di attacco a terra	Su pilotis
	Solaio inferiore	Senza coibentazione
DATI IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	Tipo di impianto	Centralizzato
	Tipo di generazione	Solo riscaldamento
	Tipo di generatore	Caldaia a gas

Tabella 32 - Dati principali dell'edificio del test di validazione 1

I risultati del fabbisogno calcolato con la simulazione e di quello stimato con la retta di regressione sono sintetizzati in tabella:

FABBISOGNO ENERGETICO	$(Q_{H,nd}/A_{floor})_{SIM.}$	57,6 kWh/m ²
	$(Q_{H,nd}/A_{floor})_{REGR.}$	60,6 kWh/m ² (+5,2%)
	$(Q_{H,del}/A_{floor})_{REGR.}$	83,0 kWh/m ²

Tabella 33 - Risultati del test di validazione 1

Come si può osservare lo scostamento tra i due è piuttosto ridotto: ciò significa che l'equazione ben approssima il reale consumo energetico per l'edificio in questione.

6.2. Test di validazione 2

Il secondo edificio su cui si è eseguito il test è un condominio ubicato in Moncalieri, di cui di seguito si riporta un'immagine.



Tabella 34 - veduta esterna dell'edificio del test di validazione 2

Nella pagina successiva vengono riportati i dati principali.

	Edificio nello stato di fatto	
	Localizzazione	Torino
	Orientamento principale	Est-Ovest
DATI GEOMETRICI	Superficie lorda del piano tipo	475 m ²
	Numero di piani abitabili	4
	Altezza netta del piano tipo	3 m
	Numero di vani scala	3
	Area totale delle facciate	1352 m ²
	WWR	15%
DATI COSTRUTTIVI	Parete esterna	Senza coibentazione
	Spessore parete	25-30 cm (26 cm)
	Colore parete esterna	Medio
	Serramenti	Vetro singolo, telaio in legno
	Copertura/solaio superiore	A falde, sottotetto non riscaldato, solaio senza coibentazione
	Tipo di attacco a terra	Rialzato
	Solaio inferiore	Senza coibentazione
DATI IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	Tipo di impianto	Centralizzato
	Tipo di generazione	Solo riscaldamento
	Tipo di generatore	Caldaia a gas

Tabella 35 - Dati principali dell'edificio del test di validazione 2

I risultati del fabbisogno calcolato con la simulazione e di quello stimato con la retta di regressione sono sintetizzati in tabella:

FABBISOGNO ENERGETICO	$(Q_{H,nd}/A_{floor})_{SIM.}$	74,8 kWh/m ²
	$(Q_{H,nd}/A_{floor})_{REGR.}$	80,5 kWh/m ² (+7,6%)
	$(Q_{H,del}/A_{floor})_{REGR.}$	110,3 kWh/m ²

Tabella 36 - Risultati del test di validazione 2

Anche in questo caso lo scostamento è piuttosto ridotto (inferiore al 10%). In entrambi i casi inoltre il risultato è conservativo: il fabbisogno stimato è superiore a quello calcolato, e questo permette di non sottostimare il consumo energetico.

7. Conclusioni

Come evidenziato dai risultati statistici dell'analisi di regressione e dai test di validazione, l'algoritmo di calcolo riesce a stimare con un buon grado di approssimazione il consumo energetico per la climatizzazione invernale degli edifici condominiali esistenti, appartenenti ad un periodo di costruzione che va dagli anni '20 del Novecento fino alle soglie del 2000. L'obiettivo infatti non è quello di fornire un risultato preciso, come ci si potrebbe aspettare da un audit, ma piuttosto di dare un'idea di base all'utilizzatore sui consumi e sui risparmi previsti. Oltretutto, gli scostamenti che si hanno non sono mai superiori al 10%, se si escludono i casi con isolamenti molto spinti. In questi casi, peraltro, i risultati derivanti sono peggiorativi e dunque conservativi, perché sottostimano il risparmio energetico.

Ovviamente i consumi reali di un edificio possono essere ben diversi da quelli pronosticati dall'algoritmo: ciò è dovuto alla standardizzazione del modello, che fa infatti riferimento ad un utente standard e a dei dati climatici standard. L'utente reale e il clima reale possono influenzare molto il comportamento del sistema edificio-impianto. Uno sviluppo futuro del tool potrebbe essere quello di calibrare il modello con i dati reali di consumo, per poter così meglio stimare i risparmi che si avrebbero con le varie tipologie di intervento.

Ad ogni modo, il modello racchiude in sé tutta una serie di semplificazioni che portano indubbiamente il risultato predetto ad essere differente da quello derivante da una simulazione dinamica dettagliata. Si può modificare l'algoritmo di calcolo in vari modi, e chiedere all'utente di inserire ulteriori informazioni per tenere in considerazione più fattori possibili; va però detto che più il modello si complica, più va a sfumare il suo obiettivo iniziale, ossia quello di fornire una stima dei consumi basandosi su poche e spesso non precise informazioni sull'edificio, che rappresenta di fatto ciò che sono le esigenze del committente.

D'altronde proprio nella semplicità sta il punto di forza del modello, che sulla base di pochi dati di input riesce a produrre risultati abbastanza accurati, tali da indirizzare l'utente, che non ha approfondite conoscenze tecniche, verso le tipologie di intervento più idonee.

Bibliografia

- [1] https://www.arera.it/it/dati/bilancio_en.htm
- [2] Ashrae, Energy Estimating and Modeling Methods, in ASHRAE Handbook: Fundamentals, Inch Pound Edition.
- [3] Corrado V., Fabrizio E., Fondamenti di termofisica dell'edificio e climatizzazione, Ed. CLUT, Capitolo 7.
- [4] Tianzhen Hong, Mary Ann Piette, Yixing Chen, Sang Hoon Lee, Sarah C. Taylor-Lange, Rongpeng Zhang, Kaiyu Sun, Phillip Price, Commercial Building Energy Saver: An energy retrofit analysis toolkit, Applied Energy 159 (2015) 298–309
- [5] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 10349-1, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata, 2016.
- [6] Ente Italiano di Normazione. UNI/TS 11300-2. Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali. Febbraio 2019.
- [7] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TS 11300-1, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, 2014.
- [8] EN 16798-1:2019. Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6, 2019.
- [9] EnergyPlus software: <https://energyplus.net/>
- [10] DesignBuilder software: <https://designbuilder.co.uk/>
- [11] Fabrizio E., Strumenti per la stima dei consumi, in CDA n.2 febbraio 2009.
- [12] V. Corrado, I. Ballarini, S. P. Corgnati. Building Typology Brochure – Italy, Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana (nuova edizione). Politecnico di Torino, 2014. Disponibile al seguente link: <http://episcopo.eu/communication/download/>
- [13] Capozzoli A., Corrado V., Gorrino A., Soma P., “Atlante nazionale dei ponti termici”, Edizione Edilclima, 2011.

Appendice A

Elenco stratigrafie (pagina 35)

PARETI:

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	15	-	1000	1	0,18
Laterizio pieno	20	0,90	840	2000	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	45 cm				
Trasmittanza termica	1,271 W/m ² K				

Parete numero 1

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	10	0,43	840	1200	-
Intercapedine	14	-	1000	1	0,18
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	40 cm				
Trasmittanza termica	1,096 W/m ² K				

Parete numero 2

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	6	-	1000	1	0,18
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	30 cm				
Trasmittanza termica	1,155 W/m ² K				

Parete numero 3

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Intercapedine	10	-	1000	1	0,18
Sughero in pannelli	2	0,052	2100	200	-
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	40 cm				
Trasmittanza termica	0,767 W/m ² K				

Parete numero 4

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Calcestruzzo	22	1,91	880	2400	-
Sughero in pannelli	4	0,043	2100	90	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	30 cm				
Trasmittanza termica	0,790 W/m ² K				

Parete numero 5

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Calcestruzzo	26	1,91	880	2400	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	30 cm				
Trasmittanza termica	2,802 W/m ² K				

Parete numero 6

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Fibra di cellulosa	11	0,040	2100	50	-
Laterizio pieno	20	0,90	840	2000	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	45 cm				
Trasmittanza termica	0,290 W/m ² K				

Parete numero 7

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	14	0,50	840	1200	-
Intercapedine	10	0,04	2100	50	0,18
Laterizio forato	12	0,50	840	1200	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	40 cm				
Trasmittanza termica	0,309 W/m ² K				

Parete numero 8

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	6	0,040	2100	50	0,18
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	30 cm				
Trasmittanza termica	0,457 W/m ² K				

Parete numero 9

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	15	-	1000	1	0,18
Laterizio pieno	20	0,90	840	2000	-
Cappotto in EPS	7	0,040	1400	15	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	52 cm				
Trasmittanza termica	0,394 W/m ² K				

Parete numero 10

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	10	0,43	840	1200	-
Intercapedine	14	-	1000	1	0,18
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Cappotto in EPS	7	0,040	1400	15	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	47 cm				
Trasmittanza termica	0,376 W/m ² K				

Parete numero 11

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	6	-	1000	1	0,18
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Cappotto in EPS	7	0,040	1400	15	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	37 cm				
Trasmittanza termica	0,382 W/m ² K				

Parete numero 12

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Calcestruzzo	26	1,91	880	2400	-
Cappotto in EPS	7	0,040	1400	15	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	37 cm				
Trasmittanza termica	0,475 W/m ² K				

Parete numero 13

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	15	-	1000	1	0,18
Laterizio pieno	20	0,90	840	2000	-
Cappotto in EPS	12	0,040	1400	15	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	57 cm				
Trasmittanza termica	0,264 W/m ² K				

Parete numero 14

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	10	0,43	840	1200	-
Intercapedine	14	-	1000	1	0,18
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Cappotto in EPS	12	0,040	1400	15	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	52 cm				
Trasmittanza termica	0,256 W/m ² K				

Parete numero 15

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	6	-	1000	1	0,18
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Cappotto in EPS	12	0,040	1400	15	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	42 cm				
Trasmittanza termica	0,259 W/m ² K				

Parete numero 16

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Calcestruzzo	26	1,91	880	2400	-
Cappotto in EPS	12	0,040	1400	15	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	42 cm				
Trasmittanza termica	0,298 W/m ² K				

Parete numero 17

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	15	-	1000	1	0,18
Laterizio pieno	20	0,90	840	2000	-
Cappotto in EPS	18	0,040	1400	15	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	63 cm				
Trasmittanza termica	0,189 W/m ² K				

Parete numero 18

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	10	0,43	840	1200	-
Intercapedine	14	-	1000	1	0,18
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Cappotto in EPS	18	0,040	1400	15	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	58 cm				
Trasmittanza termica	0,185 W/m ² K				

Parete numero 19

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Laterizio forato	8	0,43	840	1200	-
Intercapedine	6	-	1000	1	0,18
Laterizio forato	12	0,43	840	1200	-
Cappotto in EPS	18	0,040	1400	15	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	48 cm				
Trasmittanza termica	0,186 W/m ² K				

Parete numero 20

Materiale	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Calore specifico (J/kg K)	Densità (kg/m ³)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	0,70	840	1400	-
Calcestruzzo	26	1,91	880	2400	-
Cappotto in EPS	18	0,040	1400	15	-
Intonaco	2	0,90	840	1800	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	48 cm				
Trasmittanza termica	0,206 W/m ² K				

Parete numero 21

SOLAI INFERIORI:

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Piastrelle	1	2300	840	1,00	-
Calcestruzzo	8	900	1000	0,58	-
Solaio	16	1800	840	-	0,35
Intonaco	1	1800	840	0,90	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	26 cm				
Trasmittanza termica	1,300 W/m ² K				

Solaio inferiore numero 1

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Piastrelle	1	2300	840	1,00	-
Calcestruzzo	5	900	1000	1,16	-
Fibra di cellulosa	2	32	1300	0,058	-
Solaio	16	1800	840	-	0,35
Intonaco	1	1800	840	0,90	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	25 cm				
Trasmittanza termica	0,981 W/m ² K				

Solaio inferiore numero 2

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Piastrelle	1	2300	840	1,00	-
Calcestruzzo	5	2000	880	1,16	-
EPS	7	15	1400	0,040	-
Solaio	16	1800	840	-	0,35
Intonaco	1	1800	840	0,90	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	30 cm				
Trasmittanza termica	0,413 W/m ² K				

Solaio inferiore numero 3

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Piastrelle	1	2300	840	1,00	-
Calcestruzzo	5	2000	880	1,16	-
EPS	12	15	1400	0,040	-
Solaio	16	1800	840	-	0,35
Intonaco	1	1800	840	0,90	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	35 cm				
Trasmittanza termica	0,272 W/m ² K				

Solaio inferiore numero 4

SOLAI SUPERIORI:

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	1400	840	0,70	-
Solaio	18	1800	840	-	0,33
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	20 cm				
Trasmittanza termica	1,617 W/m ² K				

Solaio superiore numero 1

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	1400	840	0,70	-
Solaio	18	1800	840	-	0,33
Sughero in pannelli	2	200	2100	0,050	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	22 cm				
Trasmittanza termica	0,982 W/m ² K				

Solaio superiore numero 2

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	1400	840	0,70	-
Solaio	18	1800	840	-	0,33
EPS	7	15	1400	0,040	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	27 cm				
Trasmittanza termica	0,422 W/m ² K				

Solaio superiore numero 3

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,13
Intonaco	2	1400	840	0,70	-
Solaio	18	1800	840	-	0,33
EPS	12	15	1400	0,040	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,13
Spessore totale	32 cm				
Trasmittanza termica	0,276 W/m ² K				

Solaio superiore numero 4

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,10
Assito in legno	4	550	1600	0,15	-
Polistirolo	3	30	1220	0,045	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	7 cm				
Trasmittanza termica	0,932 W/m ² K				

Solaio superiore numero 5

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,10
Intonaco	2	1400	1000	0,70	-
Solaio	22	1800	1000	-	0,33
Polistirolo	2	35	1220	0,050	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	26 cm				
Trasmittanza termica	1,113 W/m ² K				

Solaio superiore numero 6

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,10
Assito in legno	4	550	1600	0,15	-
Polistirolo	7	30	1220	0,040	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	11 cm				
Trasmittanza termica	0,464 W/m ² K				

Solaio superiore numero 7

Materiale	Spessore (cm)	Densità (kg/m ³)	Calore specifico (J/kg K)	Conducibilità termica (W/m K)	Resistenza termica (m ² K/W)
Strato liminare interno	-	-	-	-	0,10
Assito in legno	4	550	1600	0,15	-
Polistirolo	12	30	1220	0,040	-
Strato liminare esterno	-	-	-	-	0,04
Spessore totale	16 cm				
Trasmittanza termica	0,294 W/m ² K				

Solaio superiore numero 8

Appendice B

Valori di rendimento per tipologia di impianto

Tipo di generatore	η	Vettore energetico
Caldaia a gas	0,73	GAS
Caldaia a gasolio	0,73	GASOLIO
Caldaia a condensazione	0,80	GAS
Teleriscaldamento	0,79	CALORE DA TELERISCALDAMENTO
Pompa di calore	2,43	ELETTRICITÀ