

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Implementazione di un modello di calcolo per la fattibilità tecnico-economica di interventi di efficientamento energetico su edifici esistenti



Relatrice: Prof.ssa Ilaria Ballarini

Correlatrice: Ing. Simona Paduos

Candidato: Mario Rizzo

Marzo 2022

INDICE

| | |
|---|-----------|
| Abstract | 2 |
| 1. Introduzione | 3 |
| 1.1. Inquadramento del tema e obiettivi..... | 3 |
| 1.2. Modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici..... | 4 |
| 2. Determinazione del fabbisogno di energia termica del fabbricato | 6 |
| 2.1. Costruzione del modello di regressione..... | 6 |
| 2.1.1. Definizione dell'equazione di regressione..... | 6 |
| 2.1.2. Definizione delle variabili..... | 8 |
| 2.1.3. Modellazione dell'edificio di riferimento..... | 12 |
| 2.1.4. Sviluppo dell'analisi parametrica..... | 17 |
| 2.1.5. Risultati dell'analisi di regressione | 21 |
| 2.2. Validazione del modello su edifici reali..... | 24 |
| 2.2.1. Descrizione degli edifici..... | 24 |
| 2.2.2. Primi risultati | 26 |
| 2.2.3. Definizione di fattori correttivi..... | 27 |
| 2.2.3.1. Gradi giorno..... | 27 |
| 2.2.3.2. Irraggiamento solare e ombreggiatura..... | 28 |
| 2.2.3.3. Extraflusso ad alta lunghezza d'onda verso la volta celeste..... | 31 |
| 2.2.4. Risultati finali..... | 33 |
| 2.2.5. Campo di applicabilità..... | 34 |
| 3. Determinazione del fabbisogno di energia primaria dell'edificio | 37 |
| 3.1. Sottosistemi impiantistici | 39 |
| 3.2. Acqua calda sanitaria | 45 |
| 3.3. Produzione di energia da impianto fotovoltaico | 46 |
| 3.4. Calcolo della classe energetica dell'edificio..... | 47 |
| 4. Interventi di efficientamento energetico | 49 |
| 4.1. Definizione degli interventi tipo..... | 49 |
| 4.2. Computo metrico estimativo degli interventi | 53 |
| 5. Sviluppo dello strumento di calcolo | 55 |
| 5.1. Architettura del foglio di calcolo | 55 |
| 5.2. Implementazione del modello | 58 |
| 6. Conclusioni | 64 |
| 7. Riferimenti bibliografici | 65 |

ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi è finalizzato alla realizzazione di uno strumento di calcolo, dove si coniuga rapidità computazionale e accuratezza dei risultati, per la stima del risparmio energetico e dei costi conseguenti a interventi di efficientamento energetico su edifici esistenti. Esso è rivolto a professionisti ed è basato su un modello matematico per la stima del fabbisogno di energia termica degli edifici e necessita di un numero limitato di dati di ingresso, facilmente reperibili. Il modello, di tipo grey-box, è stato costruito partendo dall'analisi parametrica svolta su un edificio di riferimento modellato con un software di calcolo semi-stazionario; il modello è stato realizzato in modo tale da garantire la validità dei risultati per le diverse zone climatiche italiane e per diverse tipologie di edifici. Lo strumento, implementato su fogli di calcolo Microsoft Excel, dopo aver calcolato la classe energetica di partenza, permette di valutare interventi di riqualificazione energetica; in modo completamente automatizzato restituisce il costo di intervento sulla base di prezziari nazionali ufficiali. È così possibile realizzare studi di fattibilità tecnico-economica di un patrimonio immobiliare in breve tempo e con un accettabile livello di accuratezza.

1. INTRODUZIONE

1.1. Inquadramento del tema e obiettivi

L'algoritmo di calcolo speditivo sviluppato nell'attività di tesi, in collaborazione con l'azienda C2R Energy Consulting S.r.l. di Torino, nasce dall'esigenza di quest'ultima di realizzare, in fase preliminare di progetto, studi di fattibilità tecnico – economica di parchi immobiliari estesi, in tempi brevi.

L'obiettivo del lavoro è quello di sviluppare uno strumento di calcolo semplificato della prestazione energetica degli edifici per il riscaldamento, basato sulla serie delle specifiche tecniche UNI/TS 11300 (normalmente utilizzato all'interno dell'azienda attraverso il software Edilclima EC700), che rispetti i canoni professionali di modellazione energetica e allo stesso tempo sia di facile utilizzo. Si tratta pertanto di uno strumento di analisi costi-benefici, che permette all'azienda di stimare velocemente quali interventi proporre e se sono economicamente sostenibili. Ciò è possibile riducendo i dati d'ingresso necessari alla modellazione, o per meglio dire i dati inseriti manualmente dall'utente, che saranno di tipo geometrico, costruttivo e impiantistico. Ovviamente il modello non avrà la precisione di una modellazione effettuata tramite software specifico da un tecnico esperto, e non è questa la finalità; d'altro canto, trattandosi di un modello di calcolo semplificato, esso è stato realizzato in modo da considerare ipotesi cautelative che conducono ad un'accettabile sovrastima del fabbisogno energetico e dei relativi costi di intervento, cosicché in una fase definitiva di progetto dovessero risultare costi e fabbisogni minori, lo scenario sarebbe comunque soddisfacente.

Nel presente lavoro di tesi si svilupperanno le diverse fasi dell'analisi di fattibilità, partendo dalla determinazione dell'algoritmo di calcolo, di tipo predittivo, creato per valutare il fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale prima, e dopo i possibili interventi (Capitolo 2); successivamente si approfondiranno i rendimenti impiantistici applicabili, e il calcolo della classe energetica dello stato di fatto (Capitolo 3). Le tipologie di interventi previste in questo studio riguardano l'isolamento dell'involucro, ossia pareti esterne e solaio superiore o copertura, la sostituzione dei serramenti, la sostituzione o la riqualificazione dell'impianto e l'installazione di fonti rinnovabili (Capitolo 4). L'ultimo capitolo illustra la modalità di implementazione del

modello all'interno di una cartella MS Excel, che rappresenta sia il motore di calcolo sia l'interfaccia grafica. Lo strumento di calcolo sviluppato è stato messo a confronto con il software EC700 su diversi edifici di prova, perfezionando così ripetutamente l'algoritmo. Per un funzionamento ottimale dello strumento si sono predisposti diversi database, basati sulle modellazioni energetiche fatte dall'azienda; il modello può essere costantemente aggiornato, in questo modo il grado di dettaglio aumenterà ad ogni utilizzo. È prevista massima flessibilità dei dati di ingresso, per un'analisi speditiva, infatti, la maggior parte dei dati è preimpostata; volendo effettuare una modellazione più accurata, si potranno inserire dati personalizzati e adattati allo specifico edificio. Sono tuttavia presenti delle limitazioni nel campo di applicabilità dello strumento che si approfondiranno nel capitolo 2.

1.2. Modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici

I modelli attualmente utilizzati in campo scientifico si suddividono in due macro-categorie i modelli "diretti" e i modelli "inversi". I primi sono molto complessi ed accurati, applicano direttamente le nozioni fisiche studiando il comportamento del sistema e le interazioni tra i fenomeni che lo influenzano. Essi sono utilizzati principalmente in caso di progettazione esecutiva, in cui non è presente un sistema fisico di riferimento. I secondi, invece, hanno lo scopo di determinare la relazione matematica che lega le variabili di ingresso e di uscita, entrambe note e misurate. 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 [1], I modelli diretti consistono tutti nel calcolo del fabbisogno di energia termica seguito dal calcolo del carico termico richiesto dai sottosistemi dell'apparato edificio-impianto e dal calcolo dell'energia primaria effettivamente richiesta dall'impianto. Il metodo più utilizzato per il calcolo è il metodo semplificato, che assume il carico termico globale come somma dei carichi termici risultanti dalle differenti sollecitazioni esterne e interne all'ambiente.

I modelli inversi a sua volta, si distinguono in tre categorie:

- I modelli Black-box, basati su un approccio empirico, consistono in un modello di regressione semplice o più articolato che correla la variabile di uscita, normalmente i consumi misurati, con una serie di variabili d'ingresso, come le condizioni

climatiche, i coefficienti del modello non hanno un preciso significato fisico, ma sono semplici e facilmente calcolabili;

- I modelli White-box, che fanno invece uso di un programma di simulazione energetica degli edifici e calibrano su esso le varie grandezze fisiche di ingresso, allo scopo di far coincidere il più possibile la quantità di energia misurata con quella predetta dal programma di simulazione [1], questa tipologia di modelli è dispendiosa in termini temporali;
- I modelli Grey-box, sono modelli “misti” che a differenza degli altri due, simulano dapprima la struttura fisica dell’edificio o degli impianti presenti al suo interno, dopodiché identifica i parametri aggregati che siano rappresentativi del sistema in esame attraverso un’analisi statistica.

I modelli 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].

Il modello utilizzato in questo lavoro di tesi è un modello inverso, di tipo grey-box che è stato adattato partendo da un algoritmo precedentemente sviluppato in un altro lavoro di tesi (*Compierchio – 2019*). A partire dal metodo semplificato per il bilancio di energia termica della UNI/TS 11300-1 [2] è stata costruita un’equazione nella quale le variabili d’ingresso costituiscono i parametri fisici e geometrici che incidono sui consumi energetici nel periodo invernale, mentre la variabile di uscita rappresenta il consumo specifico di energia per il riscaldamento. Il modello è di tipo stazionario, in quanto derivato dal metodo semplificato, anch’esso stazionario, e i fabbisogni relativi agli edifici che compongono il campione per la regressione lineare sono stati calcolati con un software di simulazione in regime semi-stazionario (EC700).

È un algoritmo di calcolo semplificato che ha lo scopo di stimare la classe energetica e i costi di investimento su vasta scala e per questo non può avere il livello di precisione di un modello diretto applicato a un edificio specifico perché i dati utilizzati sono pochi e leggermente approssimati.

2. DETERMINAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA DEL FABBRICATO

2.1. Costruzione del modello di regressione

Come precedentemente accennato, per la costruzione del modello si parte dal, metodo semplificato per il bilancio energetico e successivamente si utilizza, come strumento statistico, l'analisi di regressione su un campione di 50 edifici parametrizzati rispetto ad un edificio di riferimento, reale.

2.1.1. Definizione dell'equazione di regressione

L'analisi statistica è avvenuta tramite una regressione lineare multipla, essa ha l'obiettivo di studiare la dipendenza di una variabile quantitativa Y da un insieme di m variabili esplicative quantitative X_1, \dots, X_m , dette regressori, mediante un modello lineare. Equazione del modello:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon \quad (2.1)$$

la variabile casuale ε è la componente d'errore del modello. I parametri (non noti) del modello sono: β_0 (l'intercetta), e β_1, \dots, β_m (i coefficienti di regressione).

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (2.2)$$

il sistema può essere riscritto in maniera compatta e semplificata nella forma di un'equazione matriciale [3]. Il metodo dei *minimi quadrati* è stato utilizzato per stimare il vettore di parametri incogniti b . A partire dal vettore delle stime b calcolate rispetto a un campione di n unità è possibile determinare il vettore y^* dei valori teorici della variabile dipendente per le n unità del campione nell'ipotesi di perfetta dipendenza lineare tra Y e gli m regressori:

$$y^* = X\beta \quad (2.3)$$

La differenza tra gli n valori empirici ed i corrispondenti valori teorici di Y definisce il vettore dei residui campionari:

$$e = y - y^* = y - X\beta \quad (2.4)$$

il metodo dei minimi quadrati ricerca il vettore di coefficienti b in modo da rendere minima la somma dei quadrati degli scarti tra ordinate empiriche e ordinate teoriche, o equivalentemente, la somma dei residui al quadrato:

$$\Phi(b) = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 = \sum_{i=1}^n (e_i)^2 \quad (2.5)$$

Uguagliando a zero la derivata di $\Phi(b)$ calcolata rispetto al vettore di parametri incogniti e semplificando si ottiene un sistema di $m+1$ equazioni in $m+1$ incognite:

$$X^T X b = X^T y \quad (2.6)$$

Se $X^T X$ è invertibile il sistema ammette una sola soluzione [3]:

$$\mathbf{b}^* = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.7)$$

Questo procedimento di calcolo per la determinazione dei coefficienti dell'equazione può essere facilmente svolto con software di analisi dati (tipo Microsoft Excel).

Per la definizione dell'equazione di regressione specifica per questo lavoro, si parte dal bilancio di energia termica sensibile della norma UNI/TS 11300-1:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} - Q_{H,sol} - Q_{H,int} \quad [\text{kWh}] \quad (2.8)$$

dove: $Q_{H,nd}$ è il fabbisogno termico utile per il riscaldamento; $Q_{H,tr}$ è l'energia termica scambiata per trasmissione attraverso le superfici; $Q_{H,ve}$ è l'energia termica scambiata per ventilazione; $Q_{H,sol}$ è l'energia termica aggiunta in ambiente dalla radiazione solare attraverso le superfici di esterne; $Q_{H,int}$ è l'energia termica prodotta dalle sorgenti interne. Dall'equazione (2.8) sono state definite sette variabili indipendenti di ingresso (x_i) che sono rappresentative dei termini del bilancio energetico dell'edificio, e una

variabile d'uscita (y'), dipendete, che esprime il fabbisogno specifico utile di energia termica per il riscaldamento del fabbricato ($Q_{H,nd}/A_n$). L'equazione:

$$y' = A \cdot x_1 + B \cdot x_2 + C \cdot x_3 + D \cdot x_4 + E \cdot x_5 + F \cdot x_6 + G \cdot x_7 + H \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (2.9)$$

2.1.2. Definizione delle variabili

Le variabili (x_i) rappresentano le proprietà del fabbricato, come le caratteristiche geometriche e termofisiche dei componenti edilizi. Nello specifico, x_1 , x_2 , x_3 , e x_4 esprimono le dispersioni dell'involucro edilizio: pareti esterne, serramenti, solaio superiore e solaio inferiore. Le variabili x_5 , e x_6 esprimono gli apporti solari, dai componenti vetrati e dei componenti opachi. La variabile x_7 è rappresentativa delle dispersioni per la ventilazione. Mentre gli apporti dovuti agli occupanti o ai componenti interni sono tenuti in considerazione dalla costante H, questo perché il calcolo degli apporti interni dipende esclusivamente dall'area calpestabile. Le dispersioni dovute alle pareti su vano scala non riscaldato possono essere tenute in considerazione o meno, a discrezione dell'utente, per questo esse saranno mantenute esterne all'equazione di regressione con fattore addizionale (X_{vs}):

$$y' = A \cdot x_1 + B \cdot x_2 + C \cdot x_3 + D \cdot x_4 + E \cdot x_5 + F \cdot x_6 + G \cdot x_7 + H + X_{vs} \quad (2.10)$$

Le variabili sono così calcolate:

$$x_1 = \frac{U_{op}^* \cdot A_{op}}{A_n} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (2.11)$$

in cui:

- A_n è la superficie netta totale riscaldata [m^2];
- A_{op} è la superficie totale delle pareti verticali (opache) che separano l'ambiente riscaldato dall'esterno [m^2];
- U_{op}^* è la trasmittanza termica media riferita alla superficie A_{op} che tiene conto al suo interno dei ponti termici creati dai balconi, dai telai degli infissi e dai solai, oltre al contributo di eventuali cassonetti per avvolgibili [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

$$U_{op}^* = \frac{U_{op} \cdot A_m + \Psi_{tel} \cdot l_{tel} + 2 \cdot \Psi_{bal} \cdot l_{bal} + 2 \cdot \Psi_{sol} \cdot l_{sol} + \Psi_{cop} \cdot l_{cop} + \Psi_{pav} \cdot l_{pav} + U_{cas} \cdot A_{cas}}{A_{op}}$$

dove:

- A_m è la superficie delle pareti senza l'area dei cassonetti [m^2];
- A_{cas} è la superficie dei cassonetti [m^2];
- U_{cas} è la trasmittanza termica del cassonetto [$W/(m^2K)$];
- Ψ_{tel} è la trasmittanza lineica del ponte termico telaio-parete esterna [$W/(mK)$];
- l_{tel} è la lunghezza del ponte termico telaio-parete esterna, pari alla somma dei perimetri dei serramenti [m];
- Ψ_{bal} è la trasmittanza lineica del ponte termico balcone-parete esterna [$W/(mK)$];
- l_{bal} è la lunghezza del ponte termico balcone-parete esterna [m];
- Ψ_{sol} è la trasmittanza lineica del ponte termico solaio interpiano - parete esterna [$W/(mK)$];
- l_{sol} è la lunghezza del ponte termico solaio interpiano - parete esterna, pari al perimetro dell'edificio [m];
- Ψ_{cop} è la trasmittanza lineica del ponte termico copertura-parete esterna [$W/(mK)$];
- l_{cop} è la lunghezza del ponte termico copertura-parete esterna, pari al perimetro dell'edificio [m];
- Ψ_{pav} è la trasmittanza lineica del ponte termico solaio inferiore - parete esterna [$W/(mK)$].
- l_{pav} è la lunghezza del ponte termico solaio inferiore - parete esterna, pari al perimetro dell'edificio [m];

$$x_2 = \frac{U_w^* \cdot A_w}{A_n} \quad [W/(m^2K)] \quad (2.12)$$

In cui:

- A_w è la superficie totale dei serramenti (telaio + vetro) [m^2];
- U_w^* è la trasmittanza termica del modulo riferita alla superficie A_w comprensiva del contributo di eventuali elementi oscuranti [$W/(m^2K)$].

$$U_w^* = f_{ut} \cdot \frac{1}{\frac{1}{U_w} + R_{osc}} + (1 - f_{ut}) \cdot U_w \quad [W/(m^2K)]$$

dove:

- f_{ut} è il fattore di utilizzazione della chiusura oscurante, assunto 0.6;
- R_{osc} è la resistenza termica della chiusura oscurante compresa di eventuale intercapedine d'aria [(m²K)/W].

$$x_3 = \frac{U_r^* \cdot A_r \cdot b_{tr,r}}{A_n} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (2.13)$$

In cui:

- A_r è la superficie lorda del solaio superiore o copertura (roof) [m²];
- U_r^* è la trasmittanza termica riferita alla superficie A_r comprensiva del ponte termico solaio superiore - parete esterna [W/(m²K)];
- $b_{tr,r}$ è il fattore di riduzione delle perdite, che tiene conto della differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e il sottotetto non riscaldato.

$$U_r^* = \frac{U_r \cdot A_r + \Psi_{cop} \cdot l_{cop}}{A_r} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

dove:

- Ψ_{cop} è la trasmittanza lineica del ponte termico copertura-parete esterna [W/(mK)];
- l_{cop} è la lunghezza del ponte termico copertura-parete esterna, pari al perimetro dell'edificio [m];

$$x_4 = \frac{U_f^* \cdot A_f \cdot b_{tr,f}}{A_n} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (2.14)$$

In cui:

- A_f è la superficie lorda del solaio inferiore (floor) [m²];
- U_f^* è la trasmittanza termica riferita alla superficie A_f comprensiva del ponte termico solaio inferiore - parete esterna [W/(m²K)];
- $b_{tr,f}$ è il fattore di riduzione delle perdite, che tiene conto della differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e le eventuali cantine/garage non riscaldati.

$$U_f^* = \frac{U_f \cdot A_f + \Psi_{pav} \cdot l_{pav}}{A_f} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

dove:

- Ψ_{pav} è la trasmittanza lineica del ponte termico solaio inferiore - parete esterna [W/(mK)].
- l_{pav} è la lunghezza del ponte termico solaio inferiore - parete esterna, pari al perimetro dell'edificio [m];

$$x_5 = \frac{A_{gl} \cdot g_{gl+sh}}{A_n} \quad [-] \quad (2.15)$$

In cui:

- A_{gl} è la superficie vetrata del serramento, ovvero la superficie utile per la trasmissione dell'energia solare [m²];
- g_{gl+sh} è il fattore di trasmissione di energia solare massimo, inclusi i fattori di riduzione dovuti all'esposizione e alla presenza di eventuali schermature.

$$g_{gl+sh} = F_w \cdot [(1 - f_{sh,with}) \cdot g_{gl} + f_{sh,with} \cdot f_{sh,gl} \cdot g_{gl}] \quad [-]$$

dove:

- F_w è il fattore di esposizione massimo nei mesi di riscaldamento, assunto pari a 0,987;
- g_{gl} è il fattore di trasmissione di energia solare del vetro;
- $f_{sh,with}$ è il fattore di riduzione che tiene conto dell'uso delle schermature, che dipende dal mese, dall'esposizione e dalla località, per semplicità è stato assunto pari a 0,6 nella stagione di riscaldamento;
- $f_{sh,gl}$ è il fattore di riduzione per la presenza di schermature;

$$x_6 = \frac{U_{op} \cdot A_{op} \cdot \alpha}{A_n} \quad [W/(m^2K)] \quad (2.16)$$

dove:

- U_{op} è la trasmittanza termica delle pareti verticali esterne [W/(m²K)];
- α è il fattore di assorbimento dell'energia solare incidente sulla superficie A_{op} .

$$x_7 = h \quad [\text{m}] \quad (2.17)$$

Dove h è l'altezza media dei piani dell'edificio.

$$X_{vs} = \frac{U_{vs} \cdot A_{vs} \cdot b_{tr,vs} \cdot GG \cdot 24}{A_n} \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (2.18)$$

dove:

- A_{vs} [m²] è la superficie delle pareti che separano l'ambiente riscaldato dal vano scala non riscaldato;
- U_{vs} [W/m²K] è la trasmittanza termica riferita alle pareti di superficie A_{vs} ;
- $b_{tr,vs}$ è il fattore di riduzione delle perdite, che tiene conto della differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e il vano scala non riscaldato.
- GG sono i gradi-giorno della località, ovvero la somma delle differenze positive di temperatura tra interno ed esterno nel periodo di riscaldamento.

Il calcolo dei singoli fattori verrà poi approfondito nel dettaglio nel *Capitolo 5*. I valori che tengono conto del periodo di riscaldamento o delle condizioni climatiche, quali temperatura esterna, irraggiamento solare e ombreggiature, sono inglobate all'interno dei coefficienti della regressione lineare che si vedranno nei capitoli successivi.

2.1.3. Modellazione dell'edificio di riferimento

L'edificio riferimento da cui partirà l'analisi parametrica è un edificio residenziale condominiale sito in Torino (zona climatica E), ed è costituito da cinque piani fuori terra, ha due vani scala e il solaio inferiore separa il piano semi-interrato dedicato alle cantine dall'ambiente riscaldato, mentre all'ultimo piano è presente un sottotetto non riscaldato. Il fabbricato è stato modellato con il software Edilclima EC700 [4] e presenta un'area netta di 1249 m² e un volume lordo di 4957 m³. I dati climatici relativi al fabbricato sono:

| | |
|--|--------------------------|
| Gradi giorno | 2617 °C·d |
| Temperatura interna di progetto | 20 °C |
| Temperatura esterna di progetto | -8 °C |
| Temperatura media aria esterna | 12,6 °C |
| Irraggiamento totale sul piano orizzontale | 1378,8 MJ/m ² |
| Direzione principale esposizione | Est-Ovest |

Tabella 2.1: Dati climatici edificio di riferimento

Nella prima fase della modellazione di sono definite le caratteristiche dell'involucro edilizio, partendo dalle pareti verticali:

| Codice | Tipo | Descrizione | Sp [mm] | Ue [W/m²K] | θe [°C] |
|--------|------|---|---------|------------|---------|
| M1 | T | Muratura a cassavuota con mattoni pieni paramano e forati (...) | 450,00 | 1,271 | -8,0 |
| M2 | D | Pareti vano scala (20 cm) | 300,00 | 2,519 | - |
| M4 | T | Cassonetto | 40,00 | 6,000 | -8,0 |
| M5 | D | Partizioni interne | 100,00 | 1,972 | - |

Figura 2.1: Specifiche delle pareti verticali del fabbricato [4]

| Num | Descrizione | Spessore [mm] | Cond. [W/mK] |
|-----|---|---------------|--------------|
| 1 | Intonaco di calce e gesso | 20,00 | 0,700 |
| 2 | Muratura in laterizio pareti interne (um. 0.5%) | 80,00 | 0,430 |
| 3 | Intercapedine non ventilata Av<500 mm²/m | 150,00 | 0,833 |
| 4 | Muratura in laterizio pareti interne (um. 0.5%) | 200,00 | 0,900 |

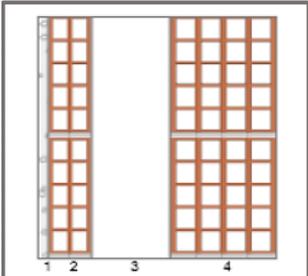


Figura 2.2: Muratura cassavuota mattoni forati e pieni esterna [4]

In seguito, i solai:

| Codice | Tipo | Descrizione | Sp [mm] | Ue [W/m²K] | θe [°C] |
|--------|------|--|---------|------------|---------|
| S1 | D | Solaio latero-cementizio interpiano | 250,00 | 1,842 | - |
| S2 | U | Solaio latero-cementizio verso sottotetto non riscaldato | 215,00 | 1,617 | -5,2 |

| Codice | Tipo | Descrizione | Sp [mm] | Ue [W/m²K] | θe [°C] |
|--------|------|---|---------|------------|---------|
| P1 | D | Solaio latero-cementizio interpiano | 250,00 | 1,465 | - |
| P2 | U | Solaio latero-cementizio verso cantine/garage | 265,00 | 1,300 | -2,4 |

Figura 2.5: Specifiche dei solai del fabbricato [4]

| Num | Descrizione | Spessore [mm] | Cond. [W/mK] |
|-----|---|---------------|--------------|
| 1 | Piastrelle in ceramica (piastrelle) | 10,00 | 1,300 |
| 2 | C.I.s. di argilla espansa sottofondi non aerati a struttura ch... | 85,00 | 0,580 |
| 3 | Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50 | 160,00 | 0,610 |
| 4 | Intonaco di gesso e sabbia | 10,00 | 0,800 |

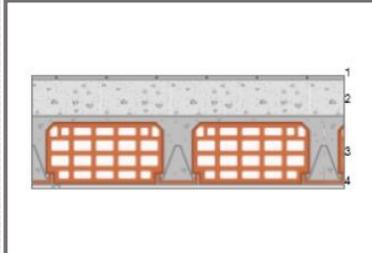


Figura 2.4: Stratigrafia solaio inferiore [4]

| Num | Descrizione | Spessore [mm] | Cond. [W/mK] |
|-----|---------------------------|---------------|--------------|
| 1 | Intonaco di calce e gesso | 20,00 | 0,700 |
| 2 | Soletta in laterizio | 195,00 | 0,500 |

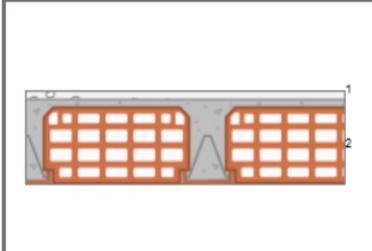


Figura 2.3: Stratigrafia solaio superiore [4]

Infine, i componenti vetrati:

| Codice | Tipo | Descrizione | L [cm] | H [cm] | Ue [w/m²K] | θe [°C] |
|--------|------|---------------------------------|--------|--------|------------|---------|
| W1 | T | F1_150x160_Legno_VS_Avvolgibili | 150,0 | 160,0 | 5,00 | -8,0 |
| W2 | T | F2_60x150_Legno_VS_Avvolgibili | 50,0 | 160,0 | 5,00 | -8,0 |
| W3 | T | PF_120x250_Legno_VS_Avvolgibili | 120,0 | 250,0 | 5,00 | -8,0 |
| W4 | T | F3_60x160_Legno_VS_Avvolgibili | 60,0 | 160,0 | 5,00 | -8,0 |

Figura 2.6: Specifiche dei serramenti del fabbricato [4]

Sono poi stati definiti i ponti termici nell'apposito modulo che mette a disposizione Edilclima EC709 [4], tenendo conto solo dei ponti termici creati dai balconi e dal telaio dei serramenti. In questa fase non sono stati considerati i ponti termici negativi relativi ai solai, ma è possibile tenerne conto nello strumento di calcolo sviluppato, a discrezione dell'utente.

| Codice | Descrizione | ψ [w/mK] |
|--------|----------------------------|---------------|
| Z1 | W - Parete esterna_Telaio | 0,167 |
| Z3 | B - Parete esterna_Balcone | 0,154 |

Figura 2.7: Caratteristiche dei ponti termici

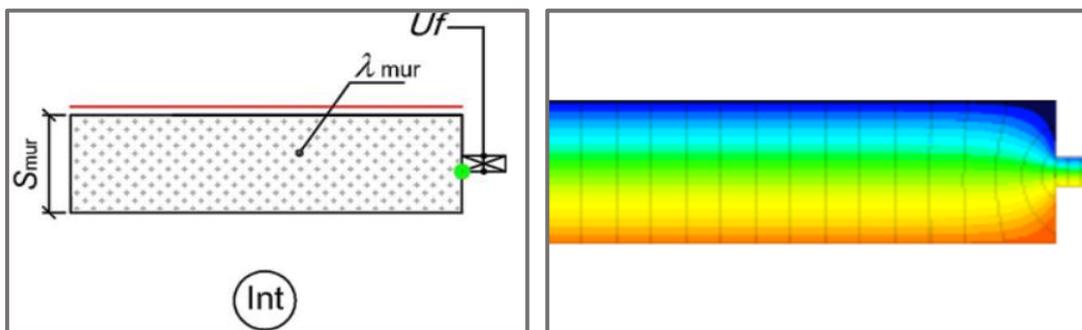


Figura 2.8: Ponte termico telaio-parete esterna

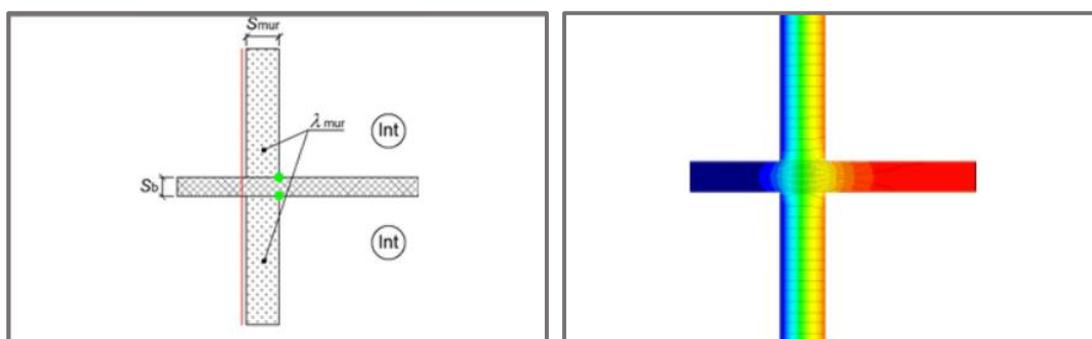


Figura 2.9: Ponte termico balcone-parete esterna

Definiti tutti i componenti necessari, si passa poi alla modellazione grafica dell'edificio, considerando che l'altezza media dei piani è di 3 m ed è rialzato da terra di 1 m.

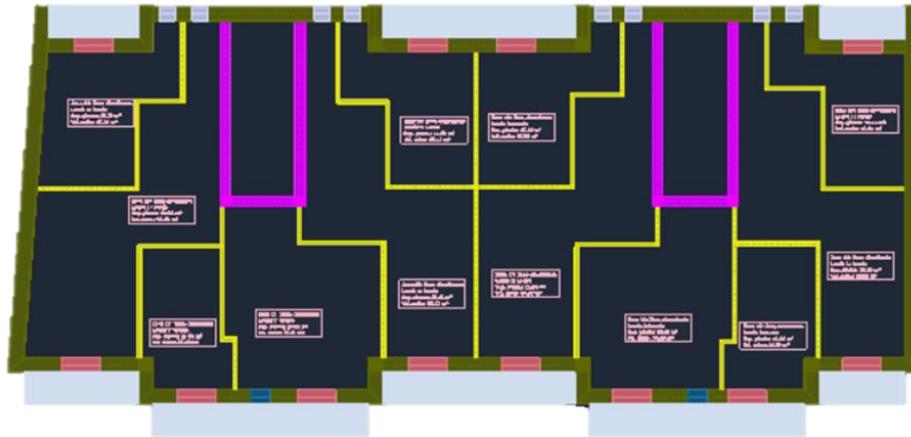


Figura 2.10: Pianta dell'edificio di riferimento

Una volta disegnate le pareti esterne, le pareti su vano scala, le partizioni interne e gli aggetti orizzontali (balconi), si inseriscono i componenti vetrati e successivamente si indentificano le zone climatizzate impostando come ricambi d'aria 0,3 Vol/h, Lo stesso procedimento si ripete per i piani successivi.

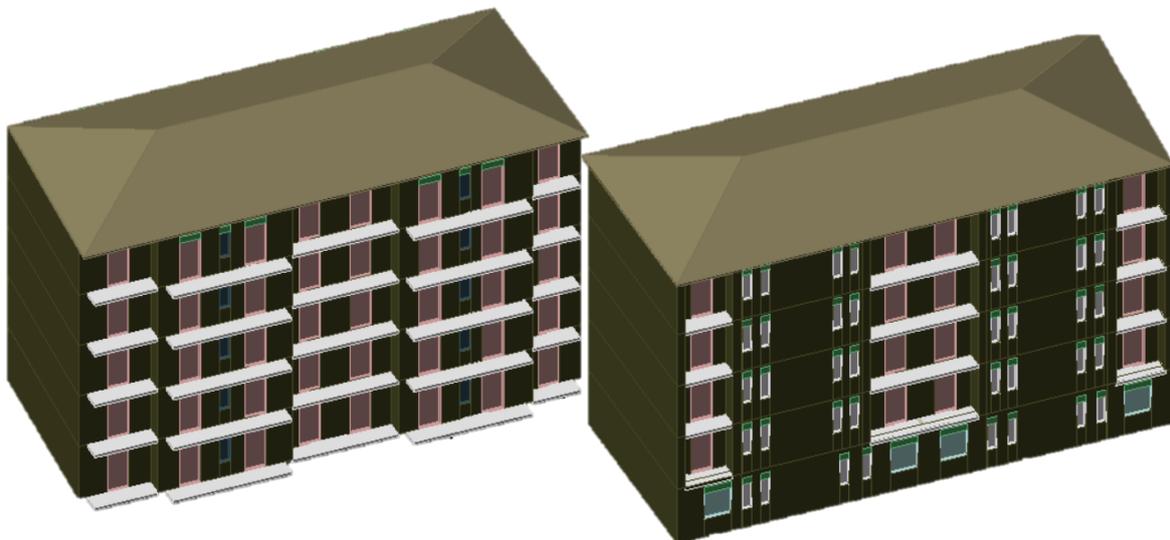


Figura 2.11: Struttura dell'edificio con vista sulle facciate principali

Terminata la modellazione geometrica si definiscono gli ombreggiamenti basandosi sull'area circostante e se ne calcolano gli effetti tramite apposita funzione del software.

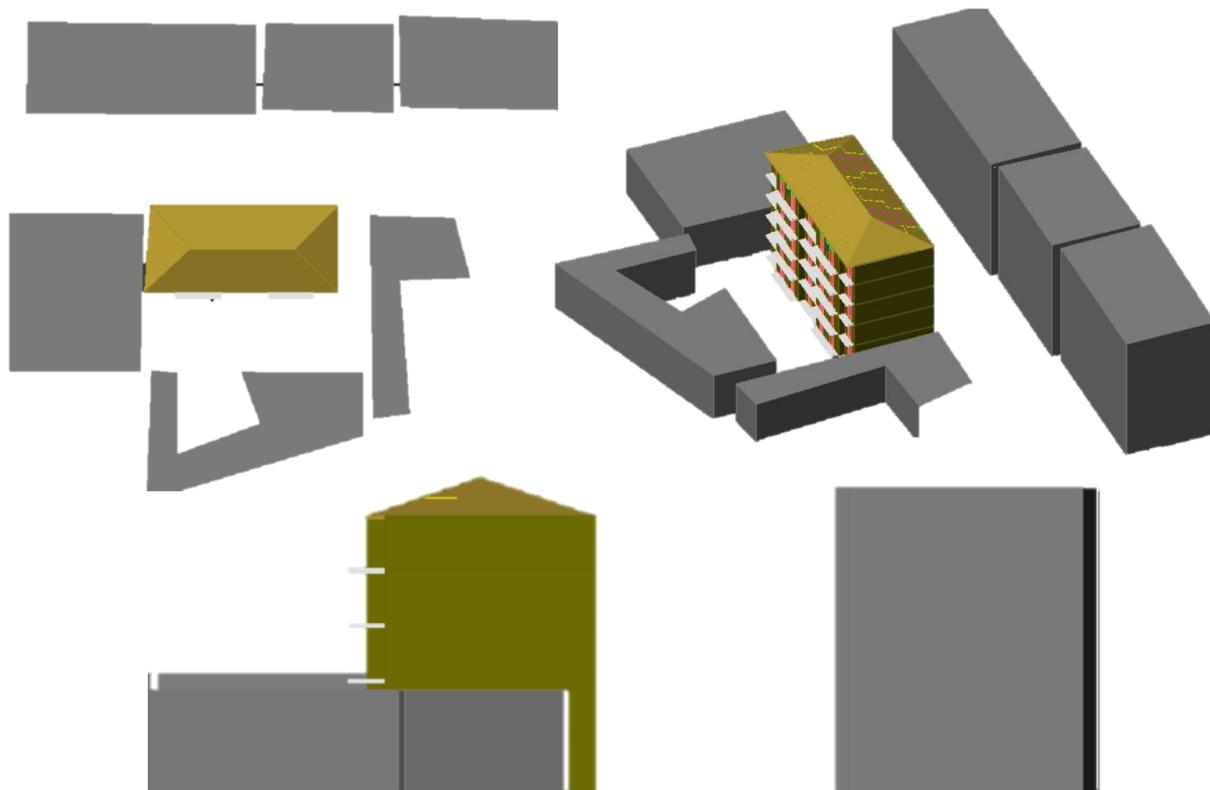


Figura 2.12: Ombreggiamenti dell'edificio secondo diverse prospettive

Edilclima EC700 per il calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio e dell'indice di prestazione energetica utilizza le seguenti norme:

- **UNI/TS 11300-1:2014**, prestazioni energetiche degli edifici. Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
- **UNI/TS 11300-2:2019**, 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.
- **UNI/TS 11300-4:2016**, Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria
- **UNI 10349-1:2016**, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici
- **UNI EN ISO 6946:2018**, Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo
- **UNI EN 12831-1:2018**, Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo del carico termico di progetto - Parte 1: Carico termico per il riscaldamento degli ambienti.

- **UNI EN ISO 13370:2018**, Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo
- **UNI EN ISO 10077:2018**, Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica
- **UNI EN ISO 12631:2018**, Prestazione termica delle facciate continue - Calcolo della trasmittanza termica
- **UNI EN ISO 14683 ed UNI EN ISO 10211**, Calcolo dei ponti termici.

2.1.4. Sviluppo dell'analisi parametrica

L'analisi parametrica condotta per lo sviluppo dell'equazione di regressione è stata effettuata partendo dall'edificio di riferimento approfondito nel precedente paragrafo e variando le caratteristiche costruttive e geometriche, in modo da creare un database di edifici il più variegato possibile. Sono state utilizzate 21 tipologie differenti di stratigrafie per le pareti verticali esterne, 8 tipologie di solai superiori, 4 di solai inferiori e 5 tipologie diverse di serramenti, prese dal precedente modello [1] e adattate.

Di seguito sono riportate le specifiche principali dei componenti. In particolare, sono presenti le trasmittanze dei componenti (U) espresse in W/m^2K , e le trasmittanze lineiche dei ponti termici di telai (Ψ_{tel}) e balconi (Ψ_{bal}) espresse in W/mK , mentre in allegato sono disponibili le stratigrafie dettagliate.

| | Descrizione | U_r^* |
|----|--|---------|
| S1 | Solaio latero-cementizio | 1,617 |
| S2 | Solaio latero-cementizio, basso livello di isolamento | 0,982 |
| S3 | Solaio latero-cementizio, medio livello di isolamento | 0,422 |
| S4 | Solaio latero-cementizio, alto livello di isolamento | 0,276 |
| S5 | Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, basso livello di isolamento | 0,932 |
| S6 | Tetto a falde in laterizio, basso livello di isolamento | 1,113 |
| S7 | Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, medio livello di isolamento | 0,464 |
| S8 | Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, alto livello di isolamento | 0,294 |

Tabella 2.2: Trasmittanze dei solai superiori

| | Descrizione | $U_f^*(r)$ | $U_f^*(p)$ |
|----|---|------------|------------|
| P1 | Solaio latero-cementizio | 1,3 | 1,565 |
| P2 | Solaio latero-cementizio, basso livello di solamente | 0,981 | 1,125 |
| P3 | Solaio latero-cementizio, medio livello di isolamento | 0,413 | 0,434 |
| P4 | Solaio latero-cementizio, alto livello di isolamento | 0,272 | 0,283 |

Tabella 2.3: Trasmittanze dei solai inferiori

| | Vetro | U_g | Telaio | U_f | U_w | g_{gl} |
|----|------------------------|-------|---------------|-------|-------|----------|
| F1 | Singolo | 5,7 | Legno | 2 | 5 | 0,82 |
| F2 | Singolo | 5,7 | Metallo | 5,9 | 5,8 | 0,82 |
| F3 | Doppio | 3,1 | Legno | 2 | 3 | 0,75 |
| F4 | Doppio basso- emissivo | 2,1 | Legno | 2 | 2,2 | 0,67 |
| F5 | Triplo basso- emissivo | 1 | Legno | 2 | 1,4 | 0,5 |

Tabella 2.4: Trasmittanze dei componenti vetrati

| | Descrizione | U_{op} | Ψ_{tel} | Ψ_{bal} | U_{op}^* |
|-----|--|----------|--------------|--------------|------------|
| M1 | Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati (45 cm) | 1,271 | 0,167 | 0,154 | 1,424 |
| M2 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati (40 cm) | 1,096 | 0,134 | 0,182 | 1,239 |
| M3 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati (30 cm) | 1,155 | 0,113 | 0,2 | 1,292 |
| M4 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati, basso livello di isolamento (40 cm) | 0,767 | 0,09 | 0,23 | 0,9 |
| M5 | Muratura in calcestruzzo, basso livello di isolamento (30 cm) | 0,79 | 0,064 | 0,26 | 0,918 |
| M6 | Muratura in calcestruzzo (30 cm) | 2,802 | 0,23 | 0,081 | 2,973 |
| M7 | Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati, isolamento con insufflaggio (45 cm) | 0,29 | 0,011 | 0,331 | 0,406 |
| M8 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati, isolamento con insufflaggio (40 cm) | 0,309 | 0,01 | 0,341 | 0,429 |
| M9 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati, isolamento con insufflaggio (30 cm) | 0,457 | 0,01 | 0,4 | 0,598 |
| M10 | Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati (45 cm), cappotto esterno (7 cm) | 0,394 | 0,427 | 0,29 | 0,748 |
| M11 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati (40 cm), cappotto esterno (7 cm) | 0,376 | 0,306 | 0,29 | 0,658 |
| M12 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati (30 cm), cappotto esterno (7 cm) | 0,382 | 0,227 | 0,323 | 0,631 |
| M13 | Muratura in calcestruzzo (30 cm), cappotto esterno (7 cm) | 0,475 | 0,647 | 0,42 | 1,013 |
| M14 | Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati (45 cm), cappotto esterno (12 cm) | 0,264 | 0,473 | 0,3 | 0,646 |
| M15 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati (40 cm), cappotto esterno (12 cm) | 0,256 | 0,347 | 0,294 | 0,563 |
| M16 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati (30 cm), cappotto esterno (12 cm) | 0,259 | 0,261 | 0,318 | 0,525 |
| M17 | Muratura in calcestruzzo (30 cm), cappotto esterno (12 cm) | 0,298 | 0,721 | 0,411 | 0,876 |
| M18 | Muratura a cassa vuota con mattoni pieni e forati (45 cm), cappotto esterno (18 cm) | 0,189 | 0,5 | 0,286 | 0,576 |
| M19 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati (40 cm), cappotto esterno (18 cm) | 0,185 | 0,385 | 0,27 | 0,5 |
| M20 | Muratura a cassa vuota con mattoni forati (30 cm), cappotto esterno (18 cm) | 0,186 | 0,28 | 0,3 | 0,452 |
| M21 | Muratura in calcestruzzo (30 cm), cappotto esterno (18 cm) | 0,206 | 0,756 | 0,372 | 0,78 |

Tabella 2.5: Trasmittanze delle pareti verticali esterne

La trasmittanza U_{op}^* non comprende il cassonetto, che è stato assunto di trasmittanza 6 W/m²K – per cassonetto non isolato – e 1 W/m²K nei casi di isolamento delle pareti. Le modifiche in campo geometrico riguardano la variazione del numero di piani (da 2 a 9), la variazione del numero di facciate disperdenti (da 4 a 2) e la variazione del numero di serramenti. Nella Tabella 2.6 si riassumono le variazioni di ogni edificio (evidenziate in arancione) rispetto a quello di riferimento.

| ED. | FA. | PI. | PA. | br | S.S. | bf | S.I. | SE. | α | S/V | WWR |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|----------|------|-------|
| 1 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 2 | 4 | 5 | M2 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,9% |
| 3 | 4 | 5 | M3 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,50 | 20,1% |
| 4 | 4 | 5 | M4 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,9% |
| 5 | 4 | 5 | M5 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,50 | 20,1% |
| 6 | 4 | 5 | M6 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,50 | 20,1% |
| 7 | 4 | 5 | M7 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 8 | 4 | 5 | M8 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,9% |
| 9 | 4 | 5 | M9 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,50 | 20,1% |
| 10 | 4 | 5 | M10 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,52 | 19,6% |
| 11 | 4 | 5 | M11 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,7% |
| 12 | 4 | 5 | M12 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,50 | 20,0% |
| 13 | 4 | 5 | M13 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,50 | 20,0% |
| 14 | 4 | 5 | M14 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,52 | 19,6% |
| 15 | 4 | 5 | M15 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,52 | 19,6% |
| 16 | 4 | 5 | M16 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,9% |
| 17 | 4 | 5 | M17 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,9% |
| 18 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S2 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,7% |
| 19 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S3 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,7% |
| 20 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S4 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,6% |
| 21 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P2 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,7% |
| 22 | 4 | 5 | M10 | 0,9 | S3 | 0,8 | P3 | F1 | 0,6 | 0,52 | 19,4% |
| 23 | 4 | 5 | M14 | 0,9 | S4 | 0,8 | P4 | F1 | 0,6 | 0,53 | 19,2% |
| 24 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 1 | P1 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 25 | 4 | 5 | M7 | 0,9 | S1 | 1 | P2 | F1 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 26 | 4 | 5 | M10 | 0,9 | S3 | 1 | P3 | F1 | 0,6 | 0,52 | 19,4% |
| 27 | 4 | 5 | M14 | 0,9 | S4 | 1 | P4 | F1 | 0,6 | 0,53 | 19,2% |
| 28 | 4 | 6 | M1 | 1 | S5 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,54 | 19,8% |
| 29 | 4 | 6 | M1 | 1 | S6 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,54 | 19,8% |
| 30 | 4 | 6 | M1 | 1 | S7 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,54 | 19,8% |
| 31 | 4 | 6 | M1 | 1 | S8 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,54 | 19,7% |
| 32 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F2 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 33 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F3 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 34 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F4 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 35 | 4 | 5 | M14 | 0,9 | S4 | 0,8 | P4 | F5 | 0,6 | 0,53 | 19,2% |
| 36 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,3 | 0,51 | 19,8% |
| 37 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,9 | 0,51 | 19,8% |
| 38 | 4 | 5 | M18 | 0,9 | S4 | 0,8 | P4 | F5 | 0,6 | 0,53 | 19,0% |
| 39 | 4 | 5 | M19 | 0,9 | S4 | 0,8 | P4 | F5 | 0,6 | 0,52 | 19,2% |
| 40 | 4 | 5 | M20 | 0,9 | S4 | 0,8 | P4 | F5 | 0,6 | 0,52 | 19,4% |
| 41 | 4 | 5 | M21 | 0,9 | S4 | 0,8 | P4 | F5 | 0,6 | 0,52 | 19,4% |

| ED. | FA. | PI. | PA. | br | S.S. | bf | S.I. | SE. | α | S/V | WWR |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|----------|------|-------|
| 42 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F2 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 43 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F3 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 44 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F4 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 45 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F5 | 0,6 | 0,51 | 19,8% |
| 46 | 4 | 5 | M14 | 0,9 | S4 | 0,8 | P4 | F5 | 0,9 | 0,53 | 19,2% |
| 47 | 4 | 6 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,48 | 19,8% |
| 48 | 4 | 7 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,47 | 19,9% |
| 49 | 4 | 8 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,45 | 19,9% |
| 50 | 4 | 4 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,55 | 19,6% |

Tabella 2.6: Variazioni di ogni edificio del campione

I cui acronimi presenti nell'intestazione, per semplicità:

- **ED** è il numero dell'edificio;
- **FA** è il numero di facciate disperdenti;
- **PI** è il numero di piani;
- **PA** è la tipologia di parete usata;
- **br** è il fattore di riduzione delle dispersioni del solaio superiore;
- **S.S** è la tipologia di solaio superiore usata;
- **bf** è il fattore di riduzione delle dispersioni del solaio inferiore;
- **S.I** è la tipologia di solaio inferiore usata;
- **SE** è la tipologia di serramento usata;
- **α** è il fattore di assorbimento solare delle pareti esterne;
- **S/V** è il rapporto tra superficie disperdente e volume lordo dell'edificio;
- **WWR** è la percentuale di superficie vetrata rispetto alla superficie totale;

Svolte le simulazioni per ogni edificio, sono stati esportati in un foglio Excel i dati utili alla costruzione della regressione, visti nel capitolo 2.1.2 ,quindi sono state calcolate le variabili x_1, \dots, x_7 di ogni edificio simulato e il fabbisogno specifico di energia termica y' presente nei dati di output del software.

Di seguito la Tabella 2.7 che riporta tutte le variabili.

| N° | x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | x6 | x7 | y' |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 1 | 1,414 | 0,877 | 0,344 | 0,256 | 0,115 | 0,849 | 3,028 | 158,337 |
| 2 | 1,248 | 0,877 | 0,339 | 0,253 | 0,115 | 0,749 | 3,028 | 147,586 |
| 3 | 1,279 | 0,876 | 0,330 | 0,246 | 0,115 | 0,768 | 3,028 | 148,191 |
| 4 | 0,961 | 0,877 | 0,339 | 0,253 | 0,115 | 0,576 | 3,028 | 130,066 |
| 5 | 0,966 | 0,876 | 0,330 | 0,246 | 0,115 | 0,580 | 3,028 | 129,176 |
| 6 | 2,688 | 0,876 | 0,330 | 0,246 | 0,115 | 1,613 | 3,028 | 234,044 |
| 7 | 0,544 | 0,877 | 0,344 | 0,256 | 0,115 | 0,326 | 3,028 | 105,696 |
| 8 | 0,561 | 0,877 | 0,339 | 0,253 | 0,115 | 0,337 | 3,028 | 106,036 |
| 9 | 0,698 | 0,876 | 0,330 | 0,246 | 0,115 | 0,419 | 3,028 | 113,091 |

| N° | x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | x6 | x7 | y' |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 10 | 0,843 | 0,878 | 0,351 | 0,261 | 0,115 | 0,506 | 3,028 | 124,949 |
| 11 | 0,761 | 0,877 | 0,346 | 0,257 | 0,115 | 0,457 | 3,028 | 119,216 |
| 12 | 0,730 | 0,877 | 0,336 | 0,250 | 0,115 | 0,438 | 3,028 | 116,001 |
| 13 | 1,053 | 0,877 | 0,336 | 0,250 | 0,115 | 0,632 | 3,028 | 136,094 |
| 14 | 0,594 | 0,883 | 0,355 | 0,264 | 0,116 | 0,357 | 3,028 | 106,202 |
| 15 | 0,519 | 0,878 | 0,351 | 0,261 | 0,115 | 0,311 | 3,028 | 100,851 |
| 16 | 0,480 | 0,881 | 0,341 | 0,254 | 0,116 | 0,288 | 3,028 | 97,110 |
| 17 | 0,779 | 0,881 | 0,341 | 0,254 | 0,116 | 0,467 | 3,028 | 115,630 |
| 18 | 1,415 | 0,877 | 0,209 | 0,256 | 0,115 | 0,849 | 3,028 | 149,897 |
| 19 | 1,421 | 0,877 | 0,090 | 0,256 | 0,115 | 0,852 | 3,028 | 142,639 |
| 20 | 1,425 | 0,877 | 0,059 | 0,256 | 0,115 | 0,855 | 3,028 | 140,937 |
| 21 | 1,415 | 0,877 | 0,344 | 0,193 | 0,115 | 0,849 | 3,030 | 154,408 |
| 22 | 0,850 | 0,878 | 0,092 | 0,083 | 0,115 | 0,510 | 3,020 | 97,548 |
| 23 | 0,769 | 0,879 | 0,061 | 0,055 | 0,115 | 0,461 | 3,010 | 89,187 |
| 24 | 1,414 | 0,877 | 0,344 | 0,385 | 0,115 | 0,849 | 3,028 | 166,567 |
| 25 | 0,544 | 0,877 | 0,344 | 0,277 | 0,115 | 0,327 | 3,030 | 107,110 |
| 26 | 0,850 | 0,878 | 0,092 | 0,109 | 0,115 | 0,510 | 3,020 | 99,296 |
| 27 | 0,769 | 0,879 | 0,061 | 0,072 | 0,115 | 0,461 | 3,010 | 90,306 |
| 28 | 1,417 | 0,880 | 0,196 | 0,213 | 0,116 | 0,850 | 2,732 | 145,921 |
| 29 | 1,418 | 0,880 | 0,234 | 0,213 | 0,116 | 0,851 | 2,710 | 150,121 |
| 30 | 1,419 | 0,880 | 0,097 | 0,213 | 0,116 | 0,852 | 2,730 | 141,191 |
| 31 | 1,424 | 0,880 | 0,062 | 0,213 | 0,116 | 0,854 | 2,724 | 139,177 |
| 32 | 1,414 | 1,018 | 0,344 | 0,256 | 0,115 | 0,849 | 3,028 | 167,388 |
| 33 | 1,414 | 0,526 | 0,344 | 0,256 | 0,105 | 0,849 | 3,028 | 137,706 |
| 34 | 1,414 | 0,386 | 0,344 | 0,256 | 0,094 | 0,849 | 3,028 | 130,279 |
| 35 | 0,392 | 0,246 | 0,061 | 0,055 | 0,070 | 0,235 | 3,010 | 29,435 |
| 36 | 1,414 | 0,877 | 0,344 | 0,256 | 0,115 | 0,424 | 3,028 | 160,633 |
| 37 | 1,414 | 0,877 | 0,344 | 0,256 | 0,115 | 1,273 | 3,028 | 156,049 |
| 38 | 0,176 | 0,246 | 0,062 | 0,056 | 0,070 | 0,105 | 3,010 | 17,065 |
| 39 | 0,170 | 0,246 | 0,061 | 0,055 | 0,070 | 0,102 | 3,010 | 16,520 |
| 40 | 0,170 | 0,246 | 0,059 | 0,054 | 0,070 | 0,102 | 3,010 | 16,240 |
| 41 | 0,187 | 0,246 | 0,059 | 0,054 | 0,070 | 0,112 | 3,010 | 17,154 |
| 42 | 1,414 | 0,526 | 0,344 | 0,256 | 0,112 | 0,849 | 3,028 | 136,361 |
| 43 | 1,414 | 0,409 | 0,344 | 0,256 | 0,039 | 0,849 | 3,028 | 139,653 |
| 44 | 1,414 | 0,456 | 0,344 | 0,256 | 0,070 | 0,849 | 3,028 | 138,009 |
| 45 | 1,414 | 0,877 | 0,344 | 0,256 | 0,070 | 0,849 | 3,028 | 165,513 |
| 46 | 0,604 | 0,246 | 0,061 | 0,055 | 0,070 | 0,544 | 3,010 | 41,061 |
| 47 | 1,423 | 0,881 | 0,287 | 0,214 | 0,116 | 0,854 | 3,023 | 152,001 |
| 48 | 1,429 | 0,882 | 0,247 | 0,183 | 0,116 | 0,858 | 3,020 | 147,35 |
| 49 | 1,434 | 0,884 | 0,216 | 0,161 | 0,116 | 0,861 | 3,018 | 143,94 |
| 50 | 1,432 | 0,873 | 0,429 | 0,319 | 0,115 | 0,859 | 3,035 | 167,780 |

Tabella 2.7: Variabili calcolate per lo sviluppo dell'equazione di regressione

2.1.5. Risultati dell'analisi di regressione

Per svolgere il calcolo dei coefficienti della regressione lineare multipla, è stato utilizzato il metodo descritto nel capitolo 2.1.1 con lo strumento "Analisi Dati" presente

nel software di calcolo Microsoft Excel [5], inserendo in input le variabili presenti nel precedente paragrafo.

I risultati dell'analisi di regressione sono:

| Statistica della regressione | |
|-------------------------------------|-----------------|
| R multiplo | 0,999671 |
| R al quadrato | 0,999341 |
| R al quadrato corretto | 0,999231 |
| Errore standard | 1,245113 |
| Osservazioni | 50 |
| Media | 123,55 |

Tabella 2.8: Risultati dell'analisi di regressione

Come si nota nella Tabella 2.8 sopra, il coefficiente R^2 è prossimo all'unità, ciò significa che l'equazione di regressione approssima i risultati delle simulazioni in modo quasi perfetto, a conferma di questo troviamo l'errore standard molto basso, 1,24 kWh/m², che su una media di 123,55 kWh/m² rappresenta meno dell'1%.

Le ultime dieci simulazioni degli edifici sono quelle con le variazioni più estreme, e sono stati utilizzati, in prima approssimazione, per valutare l'efficacia dell'equazione con ottimi risultati, ottenendo un errore massimo del 3% (Tabella 2.9).

| ED. | FA. | PI. | PA. | br | S.S. | bf | S.I. | SE. | α | S/V | WWR |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|----------|-------|-------|
| 51 | 3 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,445 | 24,0% |
| 52 | 2 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,410 | 29,8% |
| 53 | 4 | 3 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,554 | 19,6% |
| 54 | 4 | 9 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,430 | 20,0% |
| 55 | 2 | 9 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,360 | 29,2% |
| 56 | 3 | 9 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F1 | 0,6 | 0,395 | 23,7% |
| 57 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F5 | 0,6 | 0,481 | 23,4% |
| 58 | 4 | 5 | M1 | 0,9 | S1 | 0,8 | P1 | F5 | 0,6 | 0,481 | 11,5% |
| 59 | 4 | 5 | M18 | 0,9 | S4 | 0,8 | P4 | F5 | 0,9 | 0,481 | 19,7% |
| 60 | 4 | 5 | M18 | 0,9 | S4 | 0,8 | P4 | F5 | 0,3 | 0,481 | 19,7% |

Tabella 2.9: Simulazioni di prova 51-60

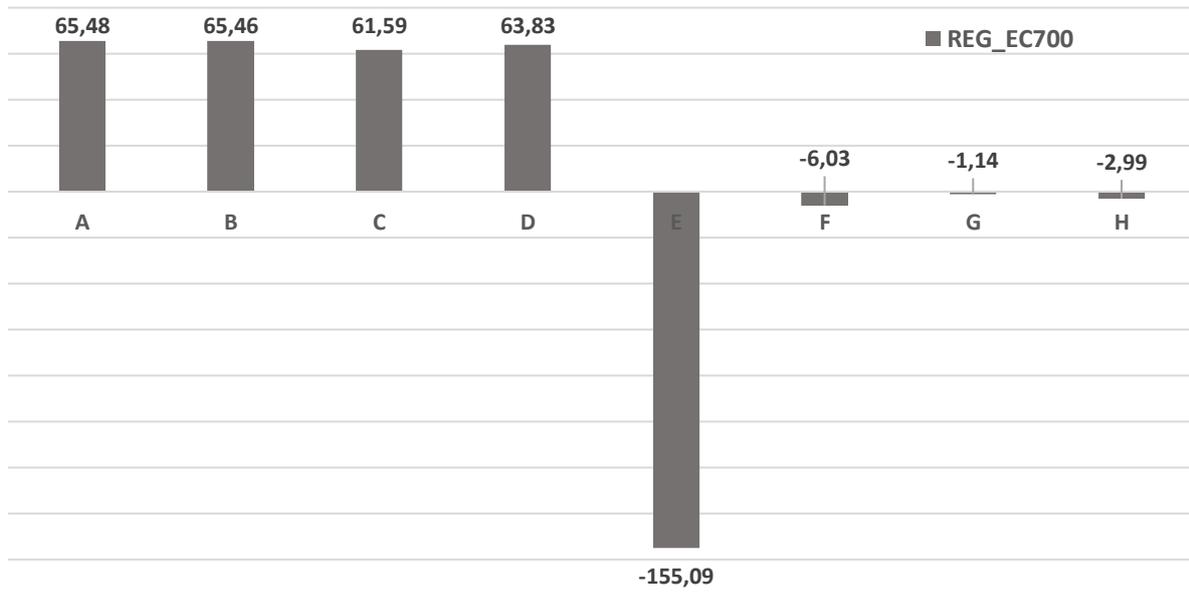
I coefficienti della regressione sono:

| A | B | C | D | E | F | G | H |
|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|---------------------|---------------------|
| kh·K | kh·K | kh·K | kh·K | kWh/ m ² | kh·K | kWh/ m ³ | kWh/ m ² |
| 65,48 | 65,46 | 61,59 | 63,83 | -155,09 | -6,03 | -1,14 | -2,99 |

Tabella 2.10: Coefficienti dell'equazione di regressione

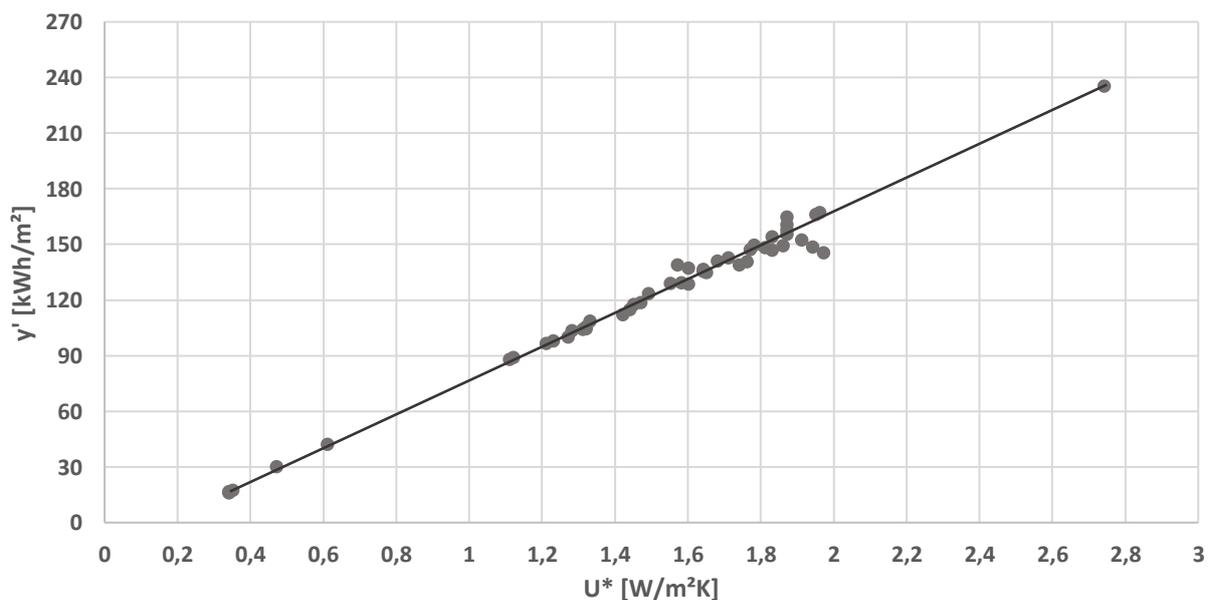
Il segno dei coefficienti non ha un reale significato fisico avendo utilizzato uno strumento puramente matematico, ma il loro valore ci fornisce qualche informazione utile su quanto sia influente sul risultato finale la variabile ad essi associati. Nel grafico seguente si nota perfettamente quanto "pesa" ogni coefficiente dell'equazione, i primi

quattro sono i più elevati, essi, infatti, corrispondono alle dispersioni per trasmissione del fabbricato.



Per capire meglio la dipendenza dell'equazione dai primi quattro fattori, e più in generale dalla trasmittanza, è stata calcolata per ogni edificio una trasmittanza equivalente (Eq. 2.19) - che rappresenta l'attitudine dell'intero involucro edilizio a scambiare calore con gli ambienti circostanti - e messa in relazione al fabbisogno specifico di energia per il riscaldamento.

$$U^* = \frac{U_{op}^* \cdot A_{op} + U_w^* \cdot c + U_r^* \cdot A_r + U_f^* \cdot A_f}{A_{op} + A_{op} + A_r + A_f} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.19)$$



È palese dal grafico come la variabile dipendente y' sia connessa in modo lineare alla trasmittanza dei componenti dell'involucro edilizio, che dovranno essere stimati correttamente.

2.2. Validazione del modello su edifici reali

2.2.1. Descrizione degli edifici

Per provare l'efficacia del modello in fase preliminare sono stati utilizzati 35 edifici situati nella regione Marche che costituiranno il campione di validazione. Gli edifici si trovano in diverse località della regione appartenenti alle zone climatiche E - D, e si differenziano anche per geometria, tipologia di componenti edilizi e ombreggiamenti.

Gli immobili sono posizionati sia in centri storici che in luoghi isolati, differenziandosi anche per anno di costruzione e muratura portante, che potrà essere in mattoni pieni, in pietra o cassavuota.

Differenti sono anche le tipologie di solai superiori e inferiori, oltre al numero di pareti disperdenti e alle diverse dispersioni su locali non climatizzati o verso il terreno che verranno approfonditi nei capitoli successivi.

| COMUNE | ZONA CLIMATICA | GRADI GIORNO | GIORNI RISCALDAMENTO | IRRADIAZIONE SOLARE |
|---------------------|----------------|--------------|----------------------|----------------------|
| | | [°C·d] | [d] | [MJ/m ²] |
| APPIGNANO | D | 1879 | 166 | 1249 |
| CASTELRAIMONDO | D | 1999 | 166 | 1279,4 |
| CINGOLI | E | 2282 | 183 | 1457,9 |
| ESANATOGLIA | E | 2161 | 183 | 1457,9 |
| GAGLIOLE | E | 2206 | 183 | 1457,9 |
| MATELICA | D | 2054 | 166 | 1279,4 |
| SAN SEVERINO MARCHE | D | 1915 | 166 | 1279,4 |
| TREIA | D | 2040 | 166 | 1279,4 |
| CIVITANOVA MARCHE | D | 1643 | 166 | 1391,3 |
| MONTECOSARO | D | 1934 | 166 | 1391,3 |
| MONTELUPONE | D | 1958 | 166 | 1391,3 |
| MORROVALLE | D | 1995 | 166 | 1391,3 |
| PORTO RECANATI | D | 1647 | 166 | 1391,3 |
| POTENZA PICENA | D | 1917 | 166 | 1391,3 |
| RECANATI | D | 1982 | 166 | 1262,8 |

Tabella 2.11: Dati climatici delle località del campione di validazione

Le specifiche degli edifici sono:

| N° | A,n | A,op | U,op | A,w | U,w | A,r | U,r | U,f | A,gl | h |
|----|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|-----|
| | [m ²] | [m ²] | [W/m ² K] | [m ²] | [W/m ² K] | [m ²] | [W/ m ² K] | [W/m ² K] | [m ²] | [m] |
| 1 | 545,3 | 667,0 | 0,8 | 67,8 | 2,3 | 216,0 | 1,7 | 1,1 | 49,9 | 2,9 |
| 2 | 429,8 | 414,2 | 1,4 | 37,6 | 2,3 | 242,1 | 1,7 | 1,1 | 30,1 | 2,9 |
| 3 | 1132,8 | 1212,4 | 0,9 | 156,0 | 2,3 | 326,2 | 1,7 | 0,7 | 124,8 | 2,9 |
| 4 | 1053,5 | 585,4 | 1,5 | 93,0 | 2,3 | 413,7 | 1,6 | 1,1 | 74,4 | 2,9 |
| 5 | 126,8 | 120,3 | 1,2 | 15,0 | 2,3 | 145,2 | 1,4 | 1,1 | 12,0 | 2,9 |
| 6 | 409,0 | 392,6 | 1,4 | 31,2 | 3,7 | 229,9 | 1,7 | 1,1 | 25,0 | 2,9 |
| 7 | 95,2 | 164,2 | 2,2 | 22,0 | 2,3 | 62,2 | 1,3 | 0,8 | 17,6 | 2,9 |
| 8 | 303,6 | 97,3 | 1,4 | 16,8 | 2,3 | 224,4 | 1,7 | 1,3 | 13,4 | 2,9 |
| 9 | 1066,8 | 1131,8 | 1,4 | 86,4 | 2,3 | 411,0 | 1,7 | 1,1 | 69,1 | 2,9 |
| 10 | 828,7 | 825,3 | 1,4 | 61,2 | 2,3 | 312,8 | 1,7 | 1,1 | 49,0 | 2,9 |
| 11 | 494,0 | 524,6 | 1,4 | 49,8 | 2,3 | 187,0 | 1,7 | 1,1 | 39,8 | 2,9 |
| 12 | 715,9 | 585,2 | 1,5 | 62,4 | 2,3 | 265,7 | 1,7 | 1,1 | 49,9 | 2,9 |
| 13 | 870,6 | 1144,1 | 1,4 | 71,1 | 2,3 | 328,2 | 1,7 | 1,1 | 56,9 | 2,9 |
| 14 | 436,6 | 496,8 | 1,4 | 61,8 | 2,3 | 167,9 | 1,7 | 1,1 | 49,4 | 2,9 |
| 15 | 210,5 | 271,0 | 1,5 | 36,0 | 4,2 | 122,9 | 1,6 | 1,0 | 28,8 | 2,9 |
| 16 | 454,3 | 777,0 | 1,6 | 60,5 | 4,1 | 281,3 | 1,6 | 1,0 | 48,4 | 2,9 |
| 17 | 991,2 | 1450,1 | 1,3 | 116,4 | 2,3 | 290,2 | 1,7 | 1,1 | 93,1 | 2,9 |
| 18 | 1041,6 | 1296,2 | 1,3 | 95,6 | 2,3 | 300,8 | 1,7 | 1,1 | 76,5 | 2,9 |
| 19 | 442,1 | 484,9 | 1,4 | 63,3 | 2,3 | 170,1 | 1,7 | 1,1 | 50,6 | 2,9 |
| 20 | 442,1 | 481,0 | 1,4 | 67,8 | 2,3 | 170,1 | 1,7 | 1,1 | 54,2 | 2,9 |
| 21 | 1124,6 | 1373,0 | 1,3 | 99,6 | 2,3 | 325,0 | 1,7 | 1,2 | 79,7 | 2,9 |
| 22 | 847,2 | 625,9 | 1,3 | 84,0 | 2,3 | 351,5 | 1,9 | 1,3 | 67,2 | 2,9 |
| 23 | 461,9 | 511,2 | 1,3 | 53,4 | 2,3 | 177,4 | 1,7 | 1,1 | 42,7 | 2,9 |
| 24 | 310,0 | 297,9 | 1,4 | 22,2 | 2,3 | 211,7 | 1,7 | 1,1 | 17,8 | 2,9 |
| 25 | 680,6 | 746,0 | 1,5 | 76,5 | 2,3 | 261,8 | 1,6 | 1,1 | 61,2 | 2,9 |
| 26 | 973,1 | 777,9 | 1,4 | 45,8 | 2,3 | 567,4 | 1,7 | 1,2 | 36,6 | 2,9 |
| 27 | 1411,4 | 1062,7 | 1,4 | 68,6 | 2,3 | 788,9 | 1,2 | 1,8 | 54,9 | 2,9 |
| 28 | 948,6 | 802,1 | 1,3 | 105,0 | 2,3 | 360,0 | 1,7 | 1,1 | 84,0 | 2,9 |
| 29 | 934,0 | 803,7 | 1,3 | 105,0 | 2,3 | 355,9 | 1,7 | 1,1 | 84,0 | 2,9 |
| 30 | 395,7 | 358,1 | 1,4 | 25,8 | 2,3 | 222,0 | 1,7 | 1,1 | 20,6 | 2,9 |
| 31 | 796,1 | 636,5 | 1,4 | 70,4 | 2,3 | 378,6 | 1,7 | 1,1 | 56,3 | 2,9 |
| 32 | 764,0 | 622,2 | 1,4 | 71,2 | 2,3 | 361,7 | 1,7 | 1,1 | 57,0 | 2,9 |
| 33 | 336,6 | 301,1 | 2,2 | 31,2 | 2,3 | 153,9 | 1,6 | 1,0 | 25,0 | 2,9 |
| 34 | 149,3 | 168,7 | 1,5 | 24,0 | 2,3 | 75,9 | 1,6 | 1,1 | 19,2 | 2,9 |
| 35 | 109,0 | 203,9 | 1,5 | 6,3 | 2,3 | 37,7 | 1,4 | 1,3 | 5,0 | 2,9 |

Tabella 2.12: Caratteristiche dei componenti del campione di validazione

Inizialmente, per tener conto della diversa località ed esposizione sono stati utilizzati fattori correttivi derivanti dal modello di riferimento [1].

2.2.2. Primi risultati

Gli edifici campione sono modellati secondo gli standard professionali delle normali FTE, i dati necessari all'applicazione dell'equazione sono quindi stati estrapolati dai modelli EC700. Per poter confrontare i risultati dei modelli Edilclima con l'equazione è stato utilizzato l'errore relativo così definito:

$$\delta = \frac{EP_{REG}}{EP_{EC}} - 1 \quad [\%] \quad (2.20)$$

| N° | LOCALITÀ | EP _{EC} [kWh/m ²] | EP _{REG} [kWh/m ²] | δ |
|----|---------------------|---|--|--------|
| 1 | APPIGNANO | 79,404 | 86,714 | 9,21% |
| 2 | CASTELRAIMONDO | 117,473 | 125,950 | 7,22% |
| 3 | CASTELRAIMONDO | 68,618 | 72,243 | 5,28% |
| 4 | CASTELRAIMONDO | 68,899 | 79,834 | 15,87% |
| 5 | CASTELRAIMONDO | 155,547 | 168,294 | 8,20% |
| 6 | CASTELRAIMONDO | 124,038 | 131,117 | 5,71% |
| 7 | CASTELRAIMONDO | 198,876 | 241,046 | 21,20% |
| 8 | CASTELRAIMONDO | 88,690 | 111,766 | 26,02% |
| 9 | CINGOLI | 138,757 | 131,038 | -5,56% |
| 10 | CINGOLI | 133,357 | 124,140 | -6,91% |
| 11 | CINGOLI | 136,191 | 130,194 | -4,40% |
| 12 | CINGOLI | 123,882 | 113,993 | -7,98% |
| 13 | CINGOLI | 159,161 | 145,522 | -8,57% |
| 14 | ESANATOGLIA | 125,367 | 130,849 | 4,37% |
| 15 | MATELICA | 155,871 | 170,462 | 9,36% |
| 16 | MATELICA | 200,431 | 206,384 | 2,97% |
| 17 | MATELICA | 125,266 | 128,436 | 2,53% |
| 18 | MATELICA | 106,820 | 111,965 | 4,82% |
| 19 | MATELICA | 109,187 | 122,502 | 12,19% |
| 20 | MATELICA | 110,361 | 119,074 | 7,89% |
| 21 | MATELICA | 106,996 | 111,643 | 4,34% |
| 22 | MATELICA | 106,245 | 102,412 | -3,61% |
| 23 | MATELICA | 103,793 | 116,225 | 11,98% |
| 24 | MATELICA | 131,840 | 148,984 | 13,00% |
| 25 | MATELICA | 114,167 | 122,582 | 7,37% |
| 26 | SAN SEVERINO MARCHE | 109,744 | 113,079 | 3,04% |
| 27 | SAN SEVERINO MARCHE | 108,659 | 108,281 | -0,35% |
| 28 | SAN SEVERINO MARCHE | 99,742 | 91,226 | -8,54% |
| 29 | SAN SEVERINO MARCHE | 101,892 | 92,315 | -9,40% |
| 30 | SAN SEVERINO MARCHE | 118,850 | 120,638 | 1,50% |
| 31 | TREIA | 111,586 | 109,581 | -1,80% |
| 32 | TREIA | 111,937 | 110,717 | -1,09% |
| 33 | TREIA | 128,782 | 142,165 | 10,39% |
| 34 | TREIA | 124,079 | 138,769 | 11,84% |
| 35 | TREIA | 139,780 | 169,570 | 21,31% |

Tabella 2.13: Risultati delle prime simulazioni di validazione

I valori evidenziati corrispondono a edifici particolari che verranno (per ora) esclusi dal campione. La media degli errori relativi in valore assoluto è di circa 5%, che di per sé è un ottimo risultato, il problema principale che si evince da questi dati è la grande differenza tra l'errore relativo minimo (-9,4%) e quello massimo (13%), oltre al fatto che i valori negativi non dovrebbero essere presenti perché rappresentano una sottostima del fabbisogno energetico. Questi errori possono essere dovuti ai fattori correttivi utilizzati per tener conto della località diversa da quella di riferimento, e per confermare ciò, sono stati modellati alcuni degli edifici campione, appartenenti a località differenti, nel contesto climatico di riferimento.

| CODICE | COMUNE | δ | δ_{rif} |
|--------|---------------------|----------|----------------|
| 1 | APPIGNANO | 9,2% | 9,0% |
| 2 | CASTELRAIMONDO | 8,2% | 6,0% |
| 5 | CINGOLI | -6,9% | 3,5% |
| 9 | CINGOLI | -8,0% | 1,7% |
| 11 | MATELICA | 2,5% | 2,3% |
| 13 | MATELICA | 4,3% | 0,4% |
| 16 | SAN SEVERINO MARCHE | 3,0% | 3,1% |
| 20 | SAN SEVERINO MARCHE | -9,4% | -4,7% |
| 28 | TREIA | -1,8% | 5,0% |

Tabella 2.14: Risultati della prova climatica

Dalla Tabella 2.14 si evince chiaramente come gli errori relativi migliorino, nonostante alcuni rimangano ancora negativi. Per risolvere queste problematiche si è svolto uno studio approfondito per ottenere dei coefficienti correttivi che tengano conto di diversi fattori dovuti al contesto climatico e territoriale.

2.2.3. Definizione di fattori correttivi

2.2.3.1. Gradi giorno

Come nel modello di riferimento, è stato definito un fattore che tiene conto della variazione dei gradi giorno della località reale rispetto a quella di riferimento su cui è basata l'equazione di regressione:

$$f_{GG} = \frac{GG_{LOC}}{GG_{RIF}} \quad (2.25)$$

dove:

- GG_{LOC} sono i gradi giorno della località considerata [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$];
- GG_{RIF} sono i gradi giorno della località di riferimento (Torino) pari a 2617 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$].

2.2.3.2. Irraggiamento solare e ombreggiatura

Per tenere conto in modo efficace delle variazioni dovute all'irraggiamento solare e all'orientamento, considerando la semplicità dei dati d'ingresso, si è supposto di far scegliere all'utente finale il tipo di geometria del fabbricato da un database preimpostato, per poi stimare l'effettiva quantità di radiazione solare che incide sulle pareti esterne. Per fare ciò, verrà dapprima identificata una direzione principale che fungerà da riferimento, essa sarà la direzione perpendicolare alla facciata più lunga dell'edificio (escluso il vano scala).

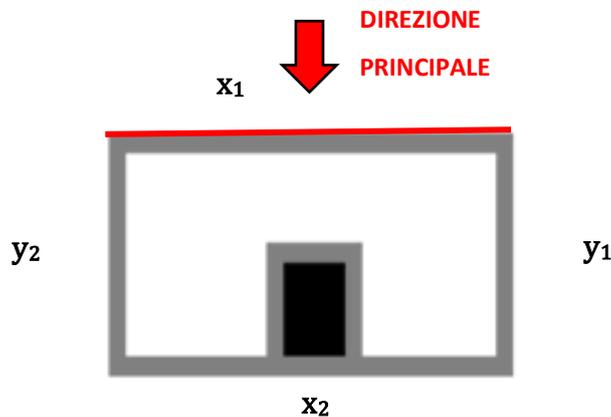


Figura 2.13: Esempio di geometria e direzione principale

on riferimento alla Figura 2.13, la facciata principale delle geometrie presenti in questo lavoro sarà sempre identificata in direzione opposta a quella frontale. La norma UNI 10349:2016 [6] fornisce l'irraggiamento solare nelle principali esposizioni e nelle diverse località italiane; per calcolare l'irradiazione totale incidente sull'edificio si utilizza la seguente formula:

$$I_{tot} = \sum_{j=1}^n \frac{(f_{xy,j} * I_{dirj})}{3,6} \quad [\text{kWh}/\text{m}^2] \quad (2.21)$$

in cui:

$$I_{dirj} = \sum_{i=1}^n I_{ij} \cdot \tau_i \quad [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad (2.22)$$

dove:

- $f_{xy,j}$ è il fattore precalcolato che tiene conto della percentuale di superficie totale dell'edificio esposta nella direzione j , che varia in base alla geometria.
- I_{dirj} è l'irraggiamento totale nella direzione j e nella stagione di riscaldamento.
- I_{ij} è l'irraggiamento medio mensile della località considerata nel mese i e nella direzione j .
- τ_i sono i giorni di riscaldamento nel mese i considerato, dipendente dalla zona climatica della località.

Il fattore correttivo da applicare all'equazione è definito come rapporto tra l'irradiazione solare totale calcolata nell'Eq. 2.21 e l'irradiazione incidente nell'edificio di riferimento.

$$f_{IRR} = \frac{I_{tot}}{I_{rif}} \quad (2.23)$$

L'irradiazione di riferimento è stata calcolata con il metodo sopra descritto applicato all'edificio di riferimento, ed è pari a 258,5 kWh/m². L'Eq.2.23 non tiene però conto delle riduzioni dovute agli ombreggiamenti; l'edificio di riferimento, infatti, è situato in una zona molto ombreggiata, e questo influisce sull'equazione. L'equazione corretta:

$$f_{IRR} = \frac{f_{sh,loc}}{f_{sh,rif}} \cdot \frac{I_{tot}}{I_{rif}} \quad (2.24)$$

Il fattore di ombreggiamento della località viene scelto dall'utente in base alla Tabella 2.15, mentre il fattore di riferimento è stato calcolato grazie alle simulazioni effettuate con il software EC700, come rapporto tra gli apporti solari in presenza di ombreggiamenti e gli apporti in assenza degli stessi.

| SCENARIO | f_{sh} |
|---------------------------|----------|
| Vegetazione sparsa | 0,948 |
| Vegetazione fitta | 0,88 |
| Isolato con pochi edifici | 0,958 |
| Centro abitato | 0,798 |
| Aggetti verticali | 0,8993 |
| Aggetti orizzontali | 0,916 |

Tabella 2.15: Fattori di ombreggiamento

Anche i fattori della Tabella 2.15 sono stati calcolati seguendo la medesima logica, applicando i diversi scenari di ombreggiamento presenti in tabella ad un edificio di prova di semplice geometria.

Le diverse geometrie implementate, oltre a quella della Fig. 2.13, sono qui illustrate.

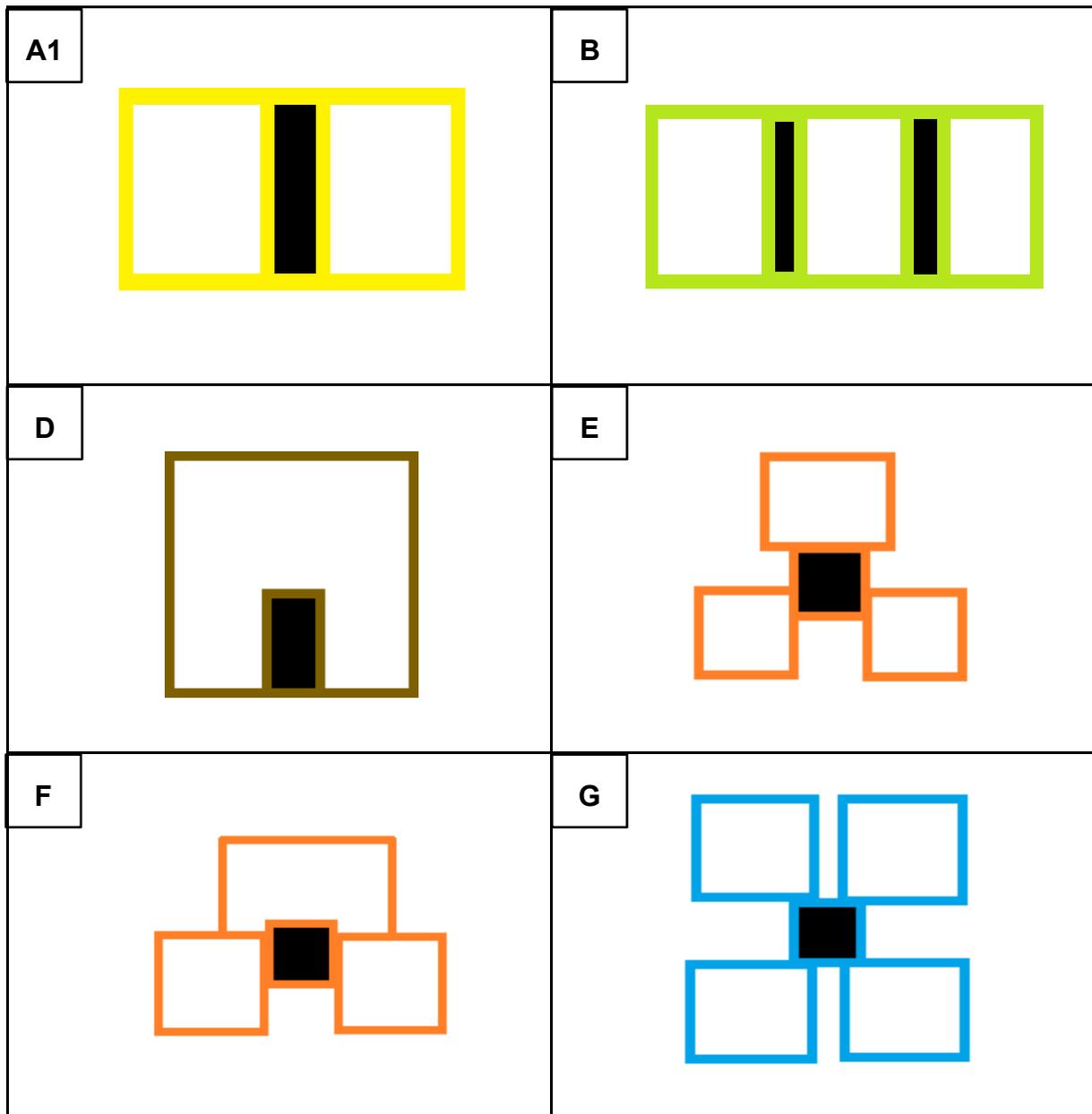


Tabella 2.16: Geometrie implementate nel modello

| MODULO | fx_1 | fy_1 | fx_2 | fy_2 | f_p |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| A | 0,362 | 0,172 | 0,294 | 0,172 | 1 |
| A1 | 0,32 | 0,18 | 0,32 | 0,18 | 1 |
| B | 0,325 | 0,175 | 0,325 | 0,175 | 1 |
| D | 0,262 | 0,262 | 0,212 | 0,264 | 1 |
| E | 0,28 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,84 |
| F | 0,362 | 0,172 | 0,294 | 0,172 | 0,92 |
| G | 0,265 | 0,235 | 0,265 | 0,235 | 0,55 |

Tabella 2.17: Fattori di forma delle geometrie

Il fattore f_p riduce l'area totale, tenendo conto delle parti di perimetro (area) non raggiungibile dal sole.

2.2.3.3. Extraflusso ad alta lunghezza d'onda verso la volta celeste

Oltre alla trasmissione del calore per via diretta tra ambienti, nel calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio si tiene conto anche del meccanismo di scambio termico radiativo tra le superfici esterne dell'edificio e la volta celeste. L'extra-flusso ad alta lunghezza d'onda considera l'emissione di raggi infrarossi da parte dei componenti dell'involucro edilizio verso la volta celeste; questo avviene, semplificando, per effetto della differenza di temperatura tra la superficie esterna del componente e il cielo. Questa dispersione è intrinsecamente considerata all'interno dei coefficienti della regressione lineare, ma essa dipende anche dal contesto climatico che verrà considerato tramite un fattore correttivo.

Il calcolo della dispersione per extraflusso viene effettuato secondo norma UNI/TS 11300-1:

$$\Phi_r = F_r \cdot R_{se} \cdot U_c \cdot A_c \cdot h_r \cdot \Delta t_{er} \quad [\text{W}] \quad (2.26)$$

dove:

- F_r è il fattore che tiene conto dell'inclinazione della superficie rispetto l'orizzontale [-];
- R_{se} è la resistenza termica superficiale esterna dell'elemento $[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$;
- U_c è la trasmittanza termica dell'elemento $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$;
- A_c è l'area dell'elemento (proiettata su un piano se l'elemento non è piano) $[\text{m}^2]$,
- h_r è il coefficiente di scambio radiativo esterno $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,
- Δt_{er} è la differenza di temperatura media tra l'aria esterna e la temperatura apparente del cielo $[\text{°C}]$.

$$F_r = \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} \quad (2.27)$$

dove α è l'angolo di inclinazione del componente su L'orizzontale. Il fattore assume il valore 0,5 nel caso di componenti verticali privi di ombreggiatura.

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (t_{ss} + 273,15)^3 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (2.28)$$

dove:

- ε è l'emissività della superficie esterna (0,9 per componenti opachi e 0,837 trasparenti);
- σ è la costante di Stefan-Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$;
- t_{ss} è la media aritmetica delle temperature della superficie e del cielo.

$$\Delta t_{er} = t_e - t_{sky} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.29)$$

dove t_{sky} è la temperatura della volta celeste calcolata mensilmente e t_e è la temperatura media giornaliera dell'aria esterna riferita alle stazioni di rilevazione dei dati climatici da norma UNI 10349.

$$t_{sky} = 18 - 51,6 * e^{\frac{-P_{ve}}{1000}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.30)$$

dove P_{ve} è la pressione di vapore media giornaliera dell'aria esterna mensile riferita alle stazioni di rilevazione dei dati climatici [Pa], da norma UNI 10349.

La formula si può riscrivere in termini energetici come:

$$Q_r = F_r \cdot R_{se} \cdot U_c \cdot A_c \cdot 24 \cdot \sum_{i=1}^n h_{r,i} \cdot \Delta t_{er,i} \cdot \tau_i \quad [\text{kWh}] \quad (2.31)$$

Dove τ_i sono i giorni di riscaldamento del mese *i-esimo* della stagione di riscaldamento. Il fattore correttivo viene calcolato come rapporto tra le dispersioni per extra-flusso dell'edificio nella propria località e quello calcolato nelle condizioni climatiche di riferimento (Torino). Considerando che i fattori che precedono la sommatoria nell' Eq.2.31 sono indipendenti dalle condizioni climatiche, il fattore assume la seguente forma:

$$f_{EX} = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{r,i} \cdot \Delta t_{er,i} \cdot \tau_i)_{LOC}}{\sum_{i=1}^n (h_{r,i} \cdot \Delta t_{er,i} \cdot \tau_i)_{RIF}} \quad (2.32)$$

Il cui denominatore è stato calcolato ed è pari a 8916 W/m²;

2.2.4. Risultati finali

Definiti i fattori correttivi, sono stati inseriti nell'Eq. 2.10:

$$y' = f_{EX} \cdot f_{GG} \cdot A \cdot x_1 + f_{EX} \cdot f_{GG} \cdot B \cdot x_2 + f_{GG} \cdot C \cdot x_3 + f_{GG} \cdot D \cdot x_4 + f_{IRR} \cdot E \cdot x_5 + f_{IRR} \cdot F \cdot x_6 + f_{GG} \cdot G \cdot x_7 + H + X_{vs} \quad (2.33)$$

L'applicazione dei fattori segue alcune logiche, in particolare, se $f_{GG} < f_{EX}$ e $f_{GG} < 1$, $f_{EX} > 1$ allora si applicano entrambi i fattori, altrimenti si applica solo il fattore f_{GG} , Questo per evitare di sottostimare i fabbisogni, mantenendo comunque una approssimazione con un errore inferiore al 10%. Nel caso di copertura piana o sottotetto riscaldato è stato invece scelto di non considerare né le dispersioni aggiuntive per extra-flusso, né gli apporti solari, che dovrebbero bilanciarsi.

La nuova equazione è stata poi testata sul campione di edifici introdotti nel capitolo 2.2.1, con i seguenti risultati:

| N° | LOCALITÀ | EP _{EC} [kWh/m ²] | EP _{REG} [kWh/m ²] | δ _{post} |
|----|---------------------|---|--|-------------------|
| 1 | APPIGNANO | 79,4 | 80,0 | 0,8% |
| 2 | CASTELRAIMONDO | 117,5 | 121,2 | 3,2% |
| 3 | CASTELRAIMONDO | 68,6 | 68,7 | 0,1% |
| 9 | CINGOLI | 138,8 | 138,8 | 0,0% |
| 10 | CINGOLI | 133,4 | 133,3 | 0,1% |
| 11 | CINGOLI | 136,2 | 137,2 | 0,8% |
| 12 | CINGOLI | 123,9 | 123,4 | 0,4% |
| 14 | ESANATOGLIA | 125,4 | 130,9 | 4,4% |
| 15 | MATELICA | 155,9 | 157,1 | 0,8% |
| 16 | MATELICA | 200,4 | 204,3 | 1,9% |
| 17 | MATELICA | 125,3 | 129,5 | 3,4% |
| 18 | MATELICA | 106,8 | 111,2 | 4,1% |
| 19 | MATELICA | 109,2 | 111,9 | 2,5% |
| 20 | MATELICA | 110,4 | 112,6 | 2,1% |
| 21 | MATELICA | 107,0 | 109,3 | 2,2% |
| 23 | MATELICA | 103,8 | 104,5 | 0,7% |
| 26 | SAN SEVERINO MARCHE | 109,7 | 110,7 | 0,9% |
| 27 | SAN SEVERINO MARCHE | 108,7 | 108,6 | 0,0% |
| 28 | SAN SEVERINO MARCHE | 99,7 | 102,8 | 3,1% |
| 29 | SAN SEVERINO MARCHE | 101,9 | 104,1 | 2,2% |
| 31 | TREIA | 111,6 | 111,4 | 0,2% |

Tabella 2.18: Risultati delle simulazioni del campione di validazione

Dalla Tabella 2.18 si vede che l'errore relativo massimo è del 4,4% e quello minimo dello 0,1%, con una media assoluta degli errori del 1,54%. Questi dati sono molto positivi, e confermano la validità dei fattori correttivi.

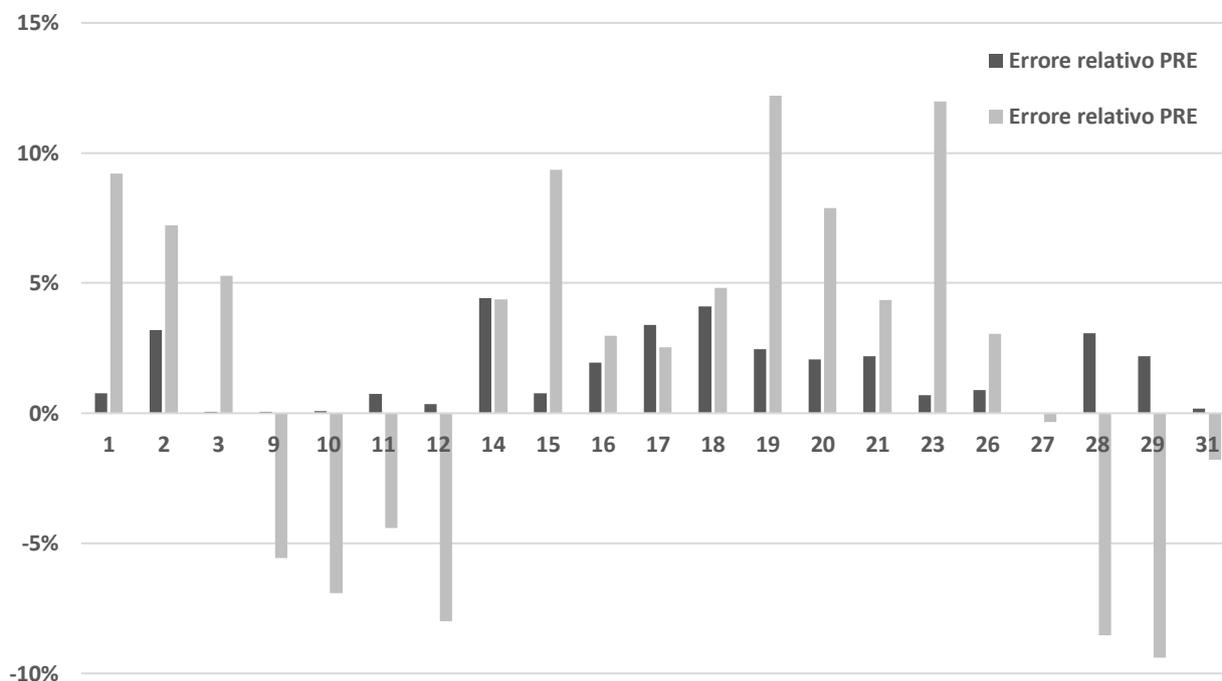


Figura 2.14: Confronto tra gli errori relativi del campione di validazione pre e post l'applicazione dei fattori correttivi

Dei 35 edifici di partenza solo 21 sono stati utilizzati per la validazione finale, gli altri sono stati esclusi dal campione per diversi motivi legati alla geometria e altri fattori, oppure presentano un errore relativo superiore al 10%; essi sono stati analizzati e utilizzati per definire il campo di validità.

2.2.5. Campo di applicabilità

Le criticità nell'applicazione del modello identificate negli edifici campione sono:

1) Differente superficie climatizzata nei piani

La superficie netta climatizzata è calcolata moltiplicando la superficie del primo piano per il numero di piani superiori, ciò significa che la superficie climatizzata deve rimanere costante nei piani.



Figura 2.15: Edificio con ambiente non riscaldato

2) Porzioni di pareti non disperdenti

Il modello è implementato per tenere in conto eventuali pareti non disperdenti, ma è efficace solo se l'intera facciata risulta non disperdente.



Figura 2.16: Edifici con porzioni di pareti non disperdenti

3) Geometria atipica o differente da quelle preimpostate

Tutte le geometrie diverse da quelle implementate nell'algoritmo non sono supportate, ovviamente nel tempo si possono inserire altre geometrie.

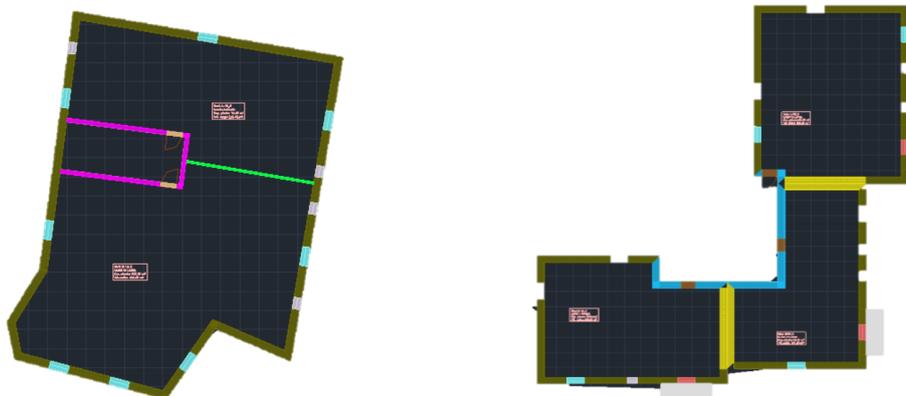


Figura 2.17: Edifici con geometrie non implementate

4) Pareti a contatto con locali non climatizzati

Gli unici ambienti non climatizzati che sono stati considerati nell'algoritmo sono: cantine/garage, sottotetto e vano scala. Se sono presenti altri ambienti, diversi da quelli implementati, all'interno dell'edificio, il modello non può essere applicato.



Inoltre, le pareti esterne che costituiscono l'involucro edilizio non devono essere confinanti con il terreno o ambienti con temperatura diversa da quella esterna, fatta eccezione per le pareti non disperdenti che possono essere considerate.

5) Superfici minori di 200 m² o numero di piani inferiori a 2

| N° | LOCALITÀ | A _{netta} | A _{op} | S/V | δ_{post} |
|----|----------------|--------------------|-----------------|-------|-----------------|
| 5 | CASTELRAIMONDO | 126,83 | 120,31 | 1,178 | 15,9% |
| 7 | CASTELRAIMONDO | 95,18 | 164,18 | 1,145 | 21,2% |
| 8 | CASTELRAIMONDO | 303,62 | 97,26 | 0,650 | 26,0% |
| 34 | TREIA | 149,34 | 168,73 | 0,809 | 10,6% |
| 35 | TREIA | 109 | 203,9 | 0,920 | 17,6% |

Tabella 2.19: Edifici del campione con superfici ridotte

Analizzando gli edifici campione che presentano un errore relativo, tra simulazione con EC700 e modello semplificato, maggiore del 10%, si nota che l'area netta è inferiore a 200 m² e/o il numero di piani è minore di 2. Anche la quantità di superficie opaca disperdente ha un ruolo nella precisione del modello, se inferiore a 250 m² diventa meno affidabile.

Riassumendo, il modello è valido secondo i seguenti criteri:

| | |
|--|----------------------------------|
| Superficie interna climatizzata non costante in tutti i piani | NON APPLICABILE |
| Presenza di pareti disperdenti verso ambienti diversi dall'ambiente esterno | NON APPLICABILE |
| Porzioni di superficie di pareti o solai disperdenti verso ambienti diversi da quelli implementati | NON APPLICABILE |
| Geometria dell'edificio diversa dalle geometrie implementate nel modello | NON APPLICABILE |
| Superficie netta riscaldata minore di 200 m ² | APPLICABILE - NON PRECISO |
| Superficie opaca disperdente minore di 250 m ² | APPLICABILE - NON PRECISO |
| Numero di piani inferiore a 2 | APPLICABILE - NON PRECISO |
| Numero di facciate non disperdenti minore di 2 | APPLICABILE - NON PRECISO |

Tabella 2.20: Criteri di applicabilità

3. DETERMINAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA DELL'EDIFICIO

Il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile dell'edificio viene calcolata come somma del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e il fabbisogno di energia primaria per la generazione di acqua calda sanitaria, come specificato nella norma UNI/TS 11300-5 [9].

$$E_{P,gl,nren} = E_{P,H,nren} + E_{P,W,nren} \quad [\text{kWh}] \quad (3.1)$$

In cui:

$$E_{P,H,nren} = \sum_k (E_{H,g,in,k} \cdot f_{p,nren,k}) + E_{H,aux} \cdot f_{p,el,nren} \quad [\text{kWh}] \quad (3.2)$$

$$E_{P,W,nren} = \sum_k (E_{W,g,in,k} \cdot f_{p,nren,k}) + E_{W,aux} \cdot f_{p,el,nren} \quad [\text{kWh}] \quad (3.3)$$

dove:

- $E_{H,g,in,k}$, $E_{W,g,in,k}$ sono l'energia in ingresso ai k -esimi generatori determinata nell'Eq. 3.4 [kWh];
- $E_{H,aux}$, $E_{W,aux}$ sono i fabbisogni di energia elettrica dei sistemi ausiliari all'impianto (Eq.3.6) [kWh];
- $f_{p,nren,k}$ sono i fattori di conversione in energia primaria non rinnovabile, dipendenti dal tipo di vettore energetico utilizzato per la generazione dell'energia termica;
- $f_{p,el,nren}$ è il fattore di conversione in energia primaria non rinnovabile per l'energia elettrica.

I valori che assumono i fattori $f_{p,nren,k}$ sono riportati in Tabella 3.1 estratta dall'allegato 1 del "Decreto interministeriale del 26 giugno 2015 - requisiti minimi".

| VEETTORE ENERGETICO | $f_{p,nren}$ |
|---------------------|--------------|
| GAS NATURALE | 1,05 |
| GASOLIO | 1,07 |
| GPL | 1,05 |
| ENERGIA ELETTRICA | 1,95 |

Tabella 3.1-Fattori di conversione in energia primaria

$$E_{H,g,in,k} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_{u,H} \cdot \eta_{gen,H}}, \quad E_{W,g,in,k} = \frac{Q_{W,nd}}{\eta_{u,W} \cdot \eta_{gen,W}} \quad [\text{kWh}] \quad (3.4)$$

dove:

- $Q_{H,nd} = y * A_n$ è il fabbisogno di energia termica utile del fabbricato determinata nel Cap.2 [kWh];
- $Q_{W,nd}$ è il fabbisogno di energia termica utile per la generazione di acqua calda sanitaria (Cap. 3.2) [kWh];
- $\eta_{u,H/W}$ è il rendimento dei sottosistemi di utilizzazione impiantistici per il riscaldamento (H) o l'acqua calda sanitaria (W);
- $\eta_{gen,H/W}$ è il rendimento del generatore di calore utilizzato per il riscaldamento (H) o l'acqua calda sanitaria (W);

$$\eta_u = \eta_{em} \cdot \eta_{rg} \cdot \eta_{dr} \quad [-] \quad (3.5)$$

I rendimenti dei sottosistemi sono determinati individualmente nel Cap. 3.1. Il fabbisogno di energia elettrica dei sistemi ausiliari è calcolato come:

$$E_{H/W,aux} = E_{aux,d} + E_{aux,e} \quad [\text{kWh}] \quad (3.6)$$

dove:

- $E_{aux,d}$ è il fabbisogno degli ausiliari del sottosistema di distribuzione [kWh];
- $E_{aux,e}$ è il fabbisogno degli ausiliari del sottosistema di emissione [kWh];

Per valutare l'efficienza dell'impianto di riscaldamento viene, inoltre, definito il rendimento medio globale stagionale:

$$\eta_{H,gl} = \frac{Q_{H,nd}}{E_{P,H,nren}} \quad [-] \quad (3.7)$$

Valori superiori a 0,9 di questo rendimento sono indice di un sistema impiantistico efficiente, nel caso di pompe di calore può essere anche superiore a 1.

3.1. Sottosistemi impiantistici

I rendimenti dei sottosistemi impiantistici dell'impianto di riscaldamento sono stati ricavati dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-2 e rielaborati per essere applicati a questo specifico lavoro.

Sottosistema di emissione

Il rendimento del sottosistema di emissione tiene conto delle perdite dovute a una imperfetta erogazione del calore in ambiente da parte dei terminali di emissione. Esso dipende principalmente dal tipo di terminale e secondariamente dal carico termico annuale espresso in W/m^3 . Per questo lavoro sono stati utilizzati le seguenti tipologie di corpi scaldanti (ipotizzando altezza dei locali <4m):

| TERMINALI | W/m ³ | | |
|--|------------------|------|------|
| | <4 | <10 | >10 |
| Radiatori su parete esterna ⁽¹⁾ | 0,92 | 0,91 | 0,89 |
| | 0,97 | 0,96 | 0,94 |
| Ventilconvettori ⁽²⁾ | 0,96 | 0,95 | 0,94 |
| Termoconvettori | 0,94 | 0,93 | 0,92 |
| Pannelli annegati a pavimento | 0,99 | 0,98 | 0,97 |
| Pannelli annegati a soffitto | 0,97 | 0,95 | 0,93 |
| Riscaldatori ad infrarossi | 0,99 | 0,98 | 0,97 |

Tabella 3.2: Rendimenti del sottosistema di immissione

(1) I radiatori si distinguono in: **stato di fatto dell'edificio** (prima riga), in cui sono stati assunti, installati su parete esterna non isolata, e temperatura di 80°C; **stato di progetto dell'edificio** (seconda riga) con installazione su parete isolata e temperatura di esercizio a 70°C.

(2) Nel caso di ventilconvettori, l'energia elettrica ausiliaria viene calcolata come segue:

$$E_{aux,e} = W_{aux,e} \cdot \tau \quad [kWh] \quad (3.8)$$

Dove $W_{aux,e}$ è la potenza del terminale disponibile in Tabella 3.3, e τ è il tempo di esercizio, espresso in ore, del terminale supponendo un funzionamento continuo.

| Portata d'aria [m ³ /h] | Potenza del terminale [W] |
|------------------------------------|---------------------------|
| < 200 m ³ /h | 40 |
| < 400 m ³ /h | 50 |
| < 600 m ³ /h | 60 |

Tabella 3.3: Potenze dei terminali di immissione

La portata d'aria viene stimata in base al volume dell'ambiente riscaldato, calcolato come rapporto tra il volume totale dell'edificio e il numero di unità abitative.

Sottosistema di regolazione

Il rendimento del sottosistema di regolazione tiene in considerazione le perdite dovute a una imperfetta gestione dei carichi dell'ambiente, una buona conoscenza dei valori termo-igrometrici dell'ambiente rende la regolazione molto più precisa e il sistema più efficiente. I sistemi di regolazione considerati in questo lavoro sono:

| SISTEMA DI REGOLAZIONE | | η_{rg} |
|----------------------------------|---------------|-------------|
| Manuale ⁽¹⁾ | | 0,82 |
| Solo Climatica ⁽¹⁾ | | 0,87 |
| Solo di zona | On-off | 0,93 |
| | P banda 2°C | 0,94 |
| | P banda 1°C | 0,97 |
| | P banda 0,5°C | 0,98 |
| | PI o PID | 0,99 |
| Solo per singolo ambiente | On-off | 0,94 |
| | P banda 2°C | 0,95 |
| | P banda 1°C | 0,98 |
| | P banda 0,5°C | 0,99 |
| | PI o PID | 0,995 |
| Zona + climatica | On-off | 0,96 |
| | P banda 2°C | 0,96 |
| | P banda 1°C | 0,97 |
| | P banda 0,5°C | 0,98 |
| | PI o PID | 0,995 |
| Per singolo ambiente + climatica | On-off | 0,97 |
| | P banda 2°C | 0,97 |
| | P banda 1°C | 0,98 |
| | P banda 0,5°C | 0,99 |
| | PI o PID | 0,995 |

Tabella 3.4: Rendimenti del sottosistema di regolazione

(1) I rendimenti delle regolazioni di tipo manuale o solo climatica dovrebbero essere calcolati in funzione del fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti e del rapporto tra apporti e dispersioni del fabbricato. Essendo questo calcolo ostico per la tipologia di modello utilizzato, i rendimenti riportati sono stati calcolati come media dei rendimenti di diverse tipologie di edifici simulati con il software EC700.

Sottosistema di distribuzione

Il rendimento del sottosistema di distribuzione considera le perdite di calore dovute allo scambio termico tra l'acqua nei tubi e l'ambiente che li circonda, esso è minore per

livelli di isolamento dei tubi insufficienti e per lunghezze dei tubi elevate. I rendimenti considerati sono stati distinti solo per tipologia di impianto:

| TIPOLOGIA DI IMPIANTO | PIANI | η_{dr} |
|------------------------------|------------|-------------|
| Autonomo ⁽¹⁾ | Intermedio | 0,99 |
| | Terra | 0,95 |
| Centralizzato ⁽²⁾ | 1 | 0,92 |
| | 2 | 0,901 |
| | 3 | 0,906 |
| | 4 + | 0,91 |

Tabella 3.5: Rendimenti sottosistema di distribuzione

(1) Nel caso di impianto autonomo vengono distinti i rendimenti relativi alla collocazione al piano terra con distribuzione monotubo e livello di isolamento dei tubi insufficiente, e collocazione in piano intermedio. Il rendimento risultante viene poi calcolato come segue:

$$\eta_{dr,tot} = \frac{0,95 + n_{piani} \cdot 0,99}{n_{piani} + 1} \quad [-] \quad (3.9)$$

(2) Nel caso di impianto centralizzato si considera una distribuzione orizzontale nel cantinato con montanti non isolati correnti nell'intercapedine dei muri esterni con livello di isolamento dei tubi medio. Il rendimento varia in base al numero di piani dell'edificio.

Il fabbisogno delle pompe di circolazione ausiliarie viene considerato solo nel caso di impianto centralizzato ed è così calcolato:

$$E_{aux,d} = W_{aux,d} \cdot A_n \quad [\text{kWh}] \quad (3.10)$$

dove $W_{aux,d}$ è l'energia per unità di superficie riscaldata disponibile nella Tabella 3.6 estratta da TABULA[]; A_n è l'area netta del fabbricato.

| GENERATORE | $W_{aux,d}$ [kWh/m ²] |
|---|-----------------------------------|
| Caldaia tradizionale, bruciatore atmosferico | 1,7 |
| Caldaia tradizionale, bruciatore a tiraggio forzato | 2,6 |
| Caldaia a condensazione | 2,6 |
| Pompa di circolazione per impianto centralizzato | 1,6 |

Tabella 3.6: Fabbisogno di energia specifica degli ausiliari di distribuzione

Sottosistema di generazione

Il rendimento del sottosistema di generazione rappresenta l'efficienza di un determinato generatore di calore tenendo conto, per esempio, delle perdite attraverso il bruciatore di una caldaia.

Esso dipende, quindi, dal tipo di generatore utilizzato, dall'installazione e dalle condizioni di esercizio dello stesso. I generatori implementati nel modello sono:

1) Caldaia tradizionale atmosferica

$$\eta_{gen} = \frac{\gamma + \left(2 - 2 \cdot \frac{P_{in}}{P_{prog}}\right) - F_2 - F_3 - F_4}{100}, \quad \left(1 \leq \frac{P_{in}}{P_{prog}} \leq 4\right) \quad [-] \quad (3.11)$$

dove:

- P_{in} è la potenza installata, se non disponibile ipotizzata pari a $1,3 \cdot P_{prog}$;
- P_{prog} è la potenza di progetto calcolata secondo normativa UNI EN 12831-1:2018 [7].

I fattori assumono i seguenti valori:

- $\gamma = 84$ se la caldaia è antecedente al 1996, altrimenti $\gamma = 90$;
- $F_2 = 9$ se installata all'esterno;
- $F_3 = 2$ se l'altezza del camino ($h_{edificio}+1$) > 10 m;
- $F_4 = 2$ se la temperatura media in caldaia è >65°C.

2) Caldaia tradizionale pressurizzata

$$\eta_{gen} = \frac{93 + \left(2 - 2 \cdot \frac{P_{in}}{P_{prog}}\right) - F_2 - F_4}{100}, \quad \left(1 \leq \frac{P_{in}}{P_{prog}} \leq 2\right) \quad [-] \quad (3.12)$$

$$\eta_{gen} = \frac{93 + \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{in}}{P_{prog}}\right) - F_2 - F_4}{100}, \quad \left(2 < \frac{P_{in}}{P_{prog}} \leq 4\right) \quad [-] \quad (3.13)$$

I fattori assumono i seguenti valori:

- $F_2 = 4$ se installata all'esterno;
- $F_4 = 1$ se la temperatura media in caldaia è $>65^\circ\text{C}$.

I fattori F_x , se non rispettano le condizioni, sono considerati nulli. Per $\frac{P_{in}}{P_{prog}} > 4$, si assume $\frac{P_{in}}{P_{prog}} = 4$;

3) Caldaia tradizionale con bruciatore premiscelato o ad aria soffiata

$$\eta_{gen} = \frac{90 + \left(4 - 4 \cdot \frac{P_{in}}{P_{prog}}\right) - F_2 - F_4 - F_5 - F_6}{100}, \quad \left(1 \leq \frac{P_{in}}{P_{prog}} \leq 1,5\right) \quad [-] \quad (3.14)$$

I fattori assumono i seguenti valori:

- $F_2 = 1$ se installata all'esterno;
- $F_4 = 1$ se la temperatura media in caldaia è $>65^\circ\text{C}$;
- $F_5 = 1$ se il generatore è monostadio;
- $F_6 = 2$ se il bruciatore è ad aria soffiata e $(h_{edificio}+1) > 10$ m.

4) Caldaia a condensazione

$$\eta_{gen} = \frac{\gamma - F_2 - F_5 - F_7}{100} \quad [-] \quad (3.15)$$

I fattori assumono i seguenti valori:

- γ dipende dalla differenza di temperatura tra i fumi e l'acqua di ritorno in caldaia a potenza nominale, disponibile in Tabella 3.7;
- $F_2 = 1$ se installata all'esterno;
- F_5 si applica se il generatore è monostadio, disponibile in Tabella 3.7;
- F_7 dipende dalla temperatura di ritorno in caldaia nel mese più freddo, assunta cautelativamente pari a 50°C , disponibile in Tabella 3.7.

| $\Delta T_{\text{fumi-acqua}} (\text{Pn})$ | γ | F_5 | F_7 |
|--|----------|-------|-------|
| < 12°C | 104 | 3 | 4 |
| < 24°C | 101 | 3 | 2 |
| > 24°C | 99 | 2 | 1 |

Tabella 3.7: Valori caldaia a condensazione

Nel caso in cui le informazioni per la definizione dei fattori F_x non siano disponibili, i fattori verranno assunti nulli.

5) Pompa di calore aria – acqua

$$\eta_{gen} = COP \quad [-] \quad (3.16)$$

Nella definizione dello stato di fatto dell'edificio, se presente una pompa di calore, il COP sarà richiesto come dato di input; se non disponibile sarà assunto pari a 2,8 , presente in TABULA;

Nel caso in cui venga inserita nello stato di progetto dell'edificio, come intervento migliorativo, si utilizzerà un COP che dipenderà dalla temperatura media esterna nella stagione di riscaldamento (Tabella 3.8).

| Temperatura media aria esterna [°C] (stagionale) | COP (stagionale) |
|--|------------------|
| < -5 °C | 3,0 |
| < 0 °C | 3,2 |
| < 5 °C | 3,3 |
| < 10 °C | 3,4 |
| < 15 °C | 3,6 |
| < 20 °C | 3,7 |
| > 20 °C | 3,8 |

Tabella 3.8: Valori del COP in base alla temperatura esterna media

3.2. Acqua calda sanitaria

Riprendendo l'Eq. 3.4, l'energia in ingresso al generatore è:

$$E_{W,g,in,k} = \frac{Q_{W,nd}}{\eta_{u,W} \cdot \eta_{gen,W}} \quad [\text{kWh}] \quad (3.17)$$

In cui:

$$Q_{W,nd} = \rho_w \cdot c_w \cdot [V_w \cdot (T_{er} - T_{w,c}) \cdot n_{UI}] \cdot G \quad [\text{kWh}] \quad (3.18)$$

dove:

- ρ_w è la densità volumetrica dell'acqua, ipotizzabile 1000 [kg/m³];
- c_w è il calore specifico dell'acqua pari a 1,162·10⁻³ [kWh/(kg·K)];
- V_w è il volume giornaliero di acqua necessaria all'attività residenziale [m³/d];
- T_{er} è la temperatura di erogazione dell'acqua per attività residenziali pari a 40 °C;
- $T_{w,c}$ è la temperatura dell'acqua in ingresso, ipotizzata uguale alla temperatura media esterna annuale della località da norma UNI 10349 [°C];
- n_{UI} è il numero di unità abitative;
- G è il numero di giorni del periodo considerato [d];
- $\eta_{u,W} = \eta_{du,W}$ è il rendimento di distribuzione, assunto pari a 0,926;
- $\eta_{gen,W}$ è il rendimento di generazione, assunto pari al rendimento di generazione del generatore di calore nel caso di produzione combinata ($\eta_{gen,H}$), e 0,9 nel caso di produzione dedicata.

$$V_w = \frac{a \cdot S_u + b}{1000} \quad [\text{m}^3/\text{d}] \quad (3.19)$$

dove:

- $S_u = A_n/n_{UI}$ è la superficie utile dell'unità abitativa;
- a, b sono coefficienti dati dalla Tabella 3.9,

| ACS | $S_u \leq 35$ | $S_u \leq 50$ | $S_u \leq 200$ | $S_u > 200$ |
|-----|---------------|---------------|----------------|-------------|
| a | 0 | 2,667 | 1,067 | 0 |
| b | 50 | -43,33 | 36,67 | 250 |

Tabella 3.9: Valore delle costanti a e b in base alla superficie utile

3.3. Produzione di energia da impianto fotovoltaico

Si considera, in questo lavoro, anche l'energia prodotta da eventuali pannelli fotovoltaici installati o da installare. Si calcola secondo UNI/TS 11300-4 [8];

$$E_{del,pv} = N_{pv} \cdot \sum I_{pv} \cdot W_{pv} \cdot \frac{f_{pv}}{I_{rif}} \quad [\text{kWh}] \quad (3.20)$$

dove:

- I_{pv} è l'irradiazione solare mensile incidente sui moduli fotovoltaici, calcolata secondo norma UNI 10349 [kWh/m²];
- W_{pv} è la potenza di picco del modulo fotovoltaico, assunta pari a 300 W., con riferimento a moduli di 2 m² di superficie;
- f_{pv} è il fattore di efficienza del modulo, riportato in Tabella 3.10;
- I_{rif} è l'irradianza di riferimento pari a 1 W/m²;
- N_{pv} è il numero di moduli installato.

| Tipo di ventilazione | f_{pv} |
|-----------------------------|----------|
| Moduli non ventilati | 0,6 |
| moduli mediamente ventilati | 0,75 |
| Moduli fortemente ventilati | 0,8 |

Tabella 3.10: Efficienze dei pannelli fotovoltaici

In questo caso l'Eq. 3.2 può essere scritta nel modo più generale:

$$E_{P,H,nren} = \sum_k (E_{del,k} \cdot f_{p,nren,k}) \quad [\text{kWh}] \quad (3.21)$$

dove $E_{del,k}$ è l'energia consegnata all'impianto attraverso il k -esimo vettore energetico. Si considera che la domanda di energia elettrica per ausiliari e pompa di calore (se presente) sia parzialmente soddisfatta dall'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico, che concorre alla determinazione dell' $EP_{gl,nren}$ con un fattore di conversione $f_{P,el,PV,nren}$ pari a 0. La quota parte della domanda di energia elettrica non soddisfatta dal fotovoltaico è coperta da rete, con un fattore di conversione $f_{P,el,grid,nren}$ pari a 1,95. L'energia elettrica da fotovoltaico è allocata proporzionalmente alle rispettive domande di energia elettrica di ausiliari e pompa di calore (se presente).

3.4. Calcolo della classe energetica dell'edificio

Per poter confrontare i risultati ottenuti con i rispettivi indici calcolati per l'edificio di riferimento, si definisce l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio, espresso dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-5, come:

$$EP_{gl,nren} = \frac{E_{p,gl,nren}}{A_n} \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (3.24)$$

Per la determinazione della classe energetica dell'edificio si fa riferimento all'appendice A del "Decreto interministeriale del 26 giugno 2015 - requisiti minimi", dove sono presenti i valori da utilizzare per il calcolo dell'indice di prestazione energetica dell'edificio di riferimento. La classe si ottiene paragonando l'indice reale con quello di riferimento secondo quanto riportato in Tabella 3.11.

| | | |
|----------------------------------|------------------|--------------------------------|
| | Classe A4 | $\leq 0,40$ $EP_{gl,nren,rif}$ |
| 0,40 $EP_{gl,nren,rif} <$ | Classe A3 | $\leq 0,60$ $EP_{gl,nren,rif}$ |
| 0,60 $EP_{gl,nren,rif} <$ | Classe A2 | $\leq 0,80$ $EP_{gl,nren,rif}$ |
| 0,80 $EP_{gl,nren,rif} <$ | Classe A1 | $\leq 1,00$ $EP_{gl,nren,rif}$ |
| 1,00 $EP_{gl,nren,rif} <$ | Classe B | $\leq 1,20$ $EP_{gl,nren,rif}$ |
| 1,20 $EP_{gl,nren,rif} <$ | Classe C | $\leq 1,50$ $EP_{gl,nren,rif}$ |
| 1,50 $EP_{gl,nren,rif} <$ | Classe D | $\leq 2,00$ $EP_{gl,nren,rif}$ |
| 2,00 $EP_{gl,nren,rif} <$ | Classe E | $\leq 2,60$ $EP_{gl,nren,rif}$ |
| 2,60 $EP_{gl,nren,rif} <$ | Classe F | $\leq 3,50$ $EP_{gl,nren,rif}$ |
| | Classe G | $> 3,50$ $EP_{gl,nren,rif}$ |

Tabella 3.11: Classi energetiche

In Tabella 3.12 si riportano i parametri termofisici del fabbricato dell'edificio di riferimento, secondo l'APPENDICE A del DM 26.06.2015 – Requisiti minimi:

| Zona climatica | U_{op} [$\text{W/m}^2\text{K}$] |
|----------------|-------------------------------------|
| A e B | 0,43 |
| C | 0,34 |
| D | 0,29 |
| E | 0,26 |
| F | 0,24 |

Tabella 3.13: Trasmittanze di riferimento pareti verticali

| Zona climatica | U_r [$\text{W/m}^2\text{K}$] |
|----------------|----------------------------------|
| A e B | 0,35 |
| C | 0,33 |
| D | 0,26 |
| E | 0,22 |
| F | 0,20 |

Tabella 3.12: Trasmittanze di riferimento solai superiori

| Zona climatica | U_f [W/m ² K] |
|----------------|----------------------------|
| A e B | 0,44 |
| C | 0,38 |
| D | 0,29 |
| E | 0,26 |
| F | 0,24 |

Tabella 3.14: Trasmittanze di riferimento solai inferiori

| Zona climatica | U_w [W/m ² K] |
|----------------|----------------------------|
| A e B | 3,00 |
| C | 2,20 |
| D | 1,80 |
| E | 1,40 |
| F | 1,10 |

Tabella 3.15: Trasmittanze di riferimento componenti vetrati

| Zona climatica | g_{gl+sh} |
|----------------|-------------|
| Tutte le zone | 0,35 |

Tabella 3.16: Fattore di trasmissione solare componenti vetrati

Di seguito si riportano i parametri caratteristici dell'impianto dell'edificio di riferimento, estratti dall'APPENDICE A del DM 26.06.2015 – Requisiti minimi:

| Efficienza dei sottosistemi di utilizzazione | η_u - Riscaldamento | η_u - ACS |
|--|--------------------------|----------------|
| Distribuzione idronica | 0,81 | 0,70 |

Tabella 3.17: Rendimenti di utilizzazione di riferimento degli impianti

| Sottosistema di generazione | η_{gen} - Riscaldamento | η_{gen} - ACS |
|---|------------------------------|--------------------|
| Generatore a combustibile liquido | 0,82 | 0,80 |
| Generatore a combustibile gassoso | 0,95 | 0,85 |
| Pompa di calore a compressione di vapore con motore elettrico | 3,00 | 2,50 |
| Pompa di calore ad assorbimento | 1,20 | 1,10 |
| Pompa di calore a compressione di vapore a motore endotermico | 1,15 | 1,05 |
| Riscaldamento con resistenza elettrica | 1,00 | - |
| Teleriscaldamento | 0,97 | - |

Tabella 3.18: Rendimenti di generazione di riferimento

Inserendo i valori riportati nelle tabelle sopra nell'algoritmo sviluppato in questo lavoro di tesi, si ottiene l'indice di prestazione energetica di riferimento dell'edificio.

4. INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO

4.1. Definizione degli interventi tipo

Gli interventi di riqualificazione energetica che verranno proposti agli utenti finali sono stati selezionati in base all'esperienza dell'azienda C2R Energy Consulting nel settore. Essi sono poco invasivi sugli edifici e non richiedono studi approfonditi in fase preliminare, così da poter fare una stima dei costi di intervento facilmente.

Gli interventi applicabili sono:

1) Isolamento termico delle pareti verticali esterne all'estradosso

Questo intervento viene proposto solo in edifici che non hanno facciate vincolate; quindi, in edifici che non sono ubicati in centro storico. Consiste nell'applicazione di materiale termicamente isolante a bassa conducibilità termica sulle facciate dell'edificio direttamente esposte all'esterno; si riducono così le dispersioni per trasmissione verso l'ambiente esterno, diminuendo la trasmittanza complessiva della parete. Le tipologie di isolanti utilizzati in questo lavoro sono riportati in Tabella 4.1.

| MATERIALE ISOLANTE | SPESSORE [cm] | CONDUCIBILITÀ TERMICA [W/(m·K)] |
|---------------------------|----------------------|--|
| POLIURETANO ESPANSO | 6 cm | 0,023 |
| POLIURETANO ESPANSO | 8 cm | 0,023 |
| POLIURETANO ESPANSO | 10 cm | 0,026 |
| POLIURETANO ESPANSO | 12 cm | 0,026 |
| POLIURETANO ESPANSO | 14 cm | 0,026 |
| PANNELLI IN LANA DI VETRO | 8 cm | 0,034 |
| PANNELLI IN LANA DI VETRO | 10 cm | 0,034 |
| PANNELLI IN LANA DI VETRO | 12 cm | 0,034 |
| PANNELLI IN LANA DI VETRO | 14 cm | 0,034 |
| PANNELLI IN LANA DI VETRO | 16 cm | 0,034 |
| PANNELLI IN LANA DI VETRO | 18 cm | 0,034 |

Tabella 4.1: Isolanti tipo utilizzati nel modello

Nel caso si volesse utilizzare un materiale differente da quelli proposti si può inserire la conducibilità termica del materiale e lo spessore desiderato. La nuova trasmittanza termica verrà calcolata sulla base della norma UNI EN ISO 6946:2018 [10], aggiungendo alla stratigrafia della muratura definita nello stato di fatto dell'edificio il materiale isolante selezionato.

$$U_{op,post} = \frac{1}{\frac{1}{U_{op,pre}} + \frac{s}{\lambda}} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (4.1)$$

Dove s è lo spessore dell'isolante [m] e λ è la sua conducibilità termica [W/(m·K)]. Il materiale e lo spessore dell'isolante verranno scelti dall'utente in base alla trasmittanza risultante, che dovrà essere inferiore a quella riportata nel DM 26.06.2015 – Requisiti minimi [11] (Tabella 3.12).

Conseguentemente all'isolamento della parete cambiano anche i ponti termici generati, infatti, essi verranno ricalcolati in base alla nuova trasmittanza termica grazie all'atlante nazionale dei ponti termici – Edilclima”, implementato nello strumento di calcolo. È bene specificare che la tipologia di ponte termico di balconi e telai è stata considerata con rivoltamento del materiale isolante (Fig. 4.1), così da diminuirne la trasmittanza lineica ad essi associata.

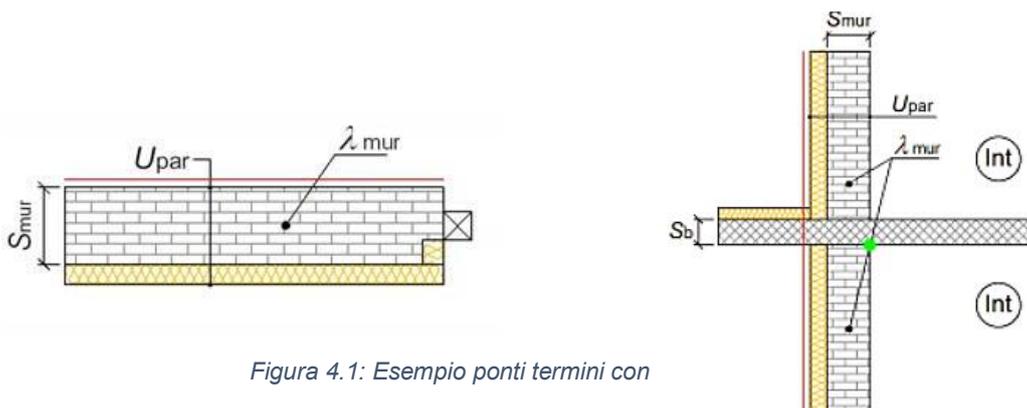


Figura 4.1: Esempio ponti termici con

La nuova variabile x_1 viene calcolata come segue:

$$x'_1 = \frac{(1 - F_{iso}) \cdot U_{op,pre}^* \cdot A_{op} + F_{iso} \cdot U_{op,post}^* \cdot A_{op}}{A_n} \quad [W/(m^2K)] \quad (4.2)$$

in cui F_{iso} è un fattore inserito dall'utente che varia da 0 a 1 e indica la percentuale di parete che si vuole isolare.

2) Isolamento termico del solaio superiore (sottotetto o copertura)

L'intervento è simile al precedente ma viene effettuato su componenti orizzontali, cambiano leggermente i materiali isolanti utilizzati e il costo dell'intervento che è generalmente più alto (specialmente nel caso di intervento sulla copertura). La metodologia con cui viene calcolata la trasmittanza del solaio risultante è quella

riportata nell'Eq. 4.1, e in questo caso l'isolamento non può essere parziale. I ponti termici utilizzati dipendono dal fatto che siano isolate le pareti esterne o meno come riportato in Fig.4.2.

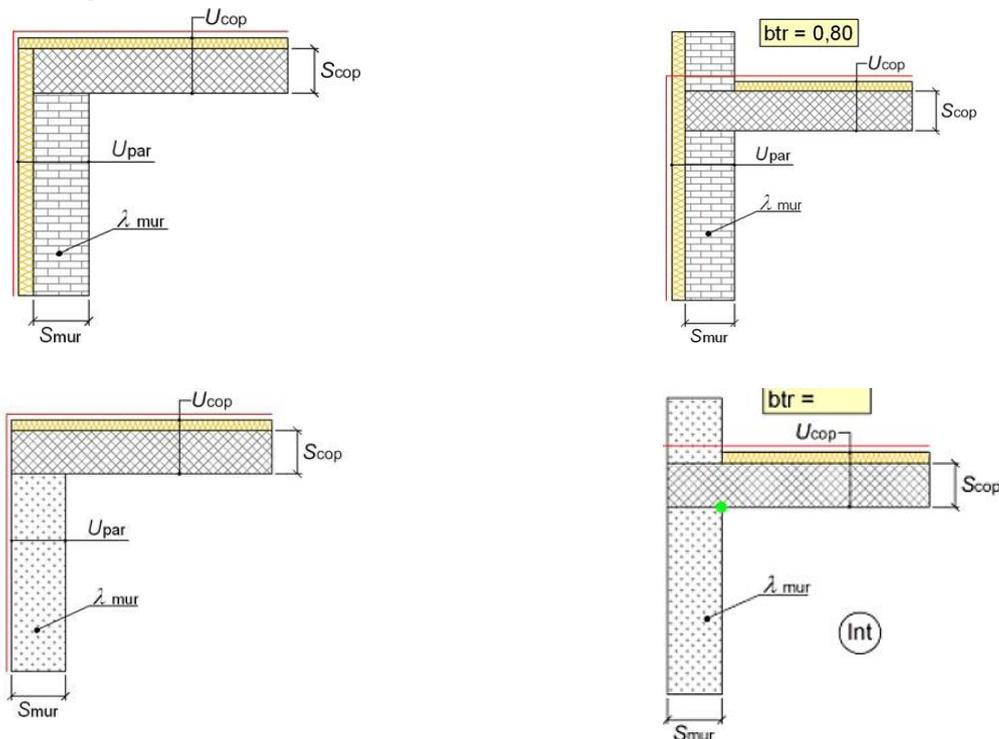


Figura 4.2: Tipologia di ponti termici del solaio superiore

3) Sostituzione dei serramenti

La sostituzione dei serramenti è un intervento che in prima approssimazione non porta un grande cambiamento nella classe energetica di un edificio, esso però è altresì importante per garantire un buon comfort termo-igrometrico negli ambienti in cui sono presenti. Nella fase di progettazione considerata in questo lavoro, la scelta di una specifica tipologia di serramento non è richiesta, si utilizza per i calcoli una $U_{w,post}^*$ leggermente minore dei valori limite presenti nella Tabella 3.16, sarà poi, in una fase esecutiva di progetto, possibile selezionare uno specifico prodotto in base alla trasmittanza prevista.

Oltre alla sostituzione degli infissi, sono previste opere ad essi correlate, come la sostituzione di chiusure oscuranti e l'isolamento dei cassonetti che incidono comunque sul calcolo delle trasmittanze termiche medie dei componenti. Viene anche prevista l'installazione di schermature così da ottenere un fattore di trasmissione solare pari a 0,35, come specificato nei requisiti minimi di legge.

4) Sostituzione o riqualificazione dei generatori di calore

Per questa tipologia di intervento si possono identificare tre diverse casistiche.

- Sostituzione di generatori autonomi per unità abitativa.
- Riqualificazione della centrale termica condominiale.
- Passaggio da impianto autonomo a impianto centralizzato.

Il primo caso è relativamente semplice da realizzare, si prevede l'installazione di un generatore di calore a condensazione compreso di valvole miscelatrici e sonda climatica esterna. La regolazione sarà prevista per singolo ambiente e climatica, mentre i sottosistemi di distribuzione ed emissione non vengono cambiati (salvo diverse disposizioni). Per il dimensionamento del generatore di calore si utilizza la norma UNI EN 12831-1, maggiorando la potenza calcolata del 10-15%,

Nel secondo caso si può prevedere sia la sostituzione del generatore con uno più performante, sia l'installazione di un nuovo tipo di generatore (e.s. Pompa di calore). In questo caso verrà riqualificata l'intera centrale termica, comprese pompe di circolazione, valvole, scambiatori e componenti accessori. Vengono sostituiti anche i sottosistemi di regolazione e di emissione, scegliendoli in base al tipo di generatore (Capitolo 3.1).

Il terzo caso è più complicato da realizzare perché richiede interventi leggermente più invasivi, verranno infatti riprogettati tutti i sottosistemi impiantistici, con costi più elevati rispetto ai casi precedenti. Questa soluzione è anche la più completa; agendo sui quattro sottosistemi contemporaneamente si può incrementare notevolmente il rendimento globale dell'impianto.

5) Installazione di pannelli fotovoltaici

Questo intervento è strettamente legato al generatore di calore, infatti, per ottenere un sostanziale contributo dall'installazione di moduli fotovoltaici è necessario prevedere generatori che utilizzano l'energia elettrica come vettore energetico principale. La combinazione di queste due soluzioni garantisce un enorme risparmio energetico. Va tuttavia tenuto in considerazione lo spazio utile per l'installazione dei moduli fotovoltaici che andranno collocati sul manto di copertura dell'edificio e la località in cui si sta operando.

La classe energetica dell'edificio successiva agli interventi verrà calcolata come descritto nel Capitolo 3.2 utilizzando i nuovi valori caratteristici dell'algoritmo.

4.2. Computo metrico estimativo degli interventi

A valle della definizione degli interventi di efficientamento energetico, lo strumento fornisce in modo automatizzato una stima dei costi di intervento basandosi sui prezzi presenti nel "Prezziario DEI 2021 – 2° semestre". I dati utili alla stima dei costi vengono inseriti in un file Excel dedicato tramite apposita Macro Excel (scritta nel linguaggio Visual Basic Application). Si propongono due metodi di calcolo dei costi:

- Il **metodo semplificato** sceglie cautelativamente i valori aggiuntivi che vengono richiesti per la stima dei costi, ovvero utilizza i valori massimi ammissibili per ognuna delle voci di prezzo presenti (prevedendo una stima elevata dei costi).
- Il **metodo dettagliato**, invece, propone l'inserimento dei valori aggiuntivi, presenti nella Tabella 4.3, da parte dell'utente finale che dovrà osservare l'edificio in modo dettagliato. Questa soluzione fornisce dei costi più vicini alla realtà ma comunque sovrastimati.

In entrambi i metodi l'algoritmo di calcolo è il medesimo; sono presenti tanti fogli Excel quanti sono gli interventi possibili, e in ognuno di essi è presente un elenco di voci di prezzo di lavorazioni o materiali caratteristici dell'intervento, selezionati con l'aiuto di personale specializzato dell'azienda. Le quantità inserite sono calcolate con apposite formule, tenendo conto di quanto scritto nella voce stessa, e sono maggiorate del 10%.

| DATI | UM |
|---|----------------|
| Marmi su finestre | |
| Perimetro edificio con offset 2m | m |
| N° ancoraggi balconi | - |
| Lunghezza ringhiera | m |
| Area balcone | m ² |
| Numero pluviali | - |
| Rivestimento | m ² |
| Rivestimenti da mettere | |
| Percentuale degrado intonaco | - |
| Numero di unità caldaie a muro esterno | - |
| Numero unità condizionatori esterni | - |
| Grata | - |
| Numero grate | m ² |
| Numero plafoniere balconi | - |
| Cavi elettrici esterni | - |

Figura 4.3: Dati aggiuntivi richiesti per il computo metrico estimativo

Ogni voce può essere modificata adattandola alle necessità del caso, l'importo finale viene poi visualizzato in un apposito foglio Excel dove si possono costruire diversi scenari (Fig. 4.4).

In questo foglio è presente l'elenco degli interventi applicabili con i relativi importi; è possibile scegliere se applicare un bonus fiscale agli interventi e tramite apposita spunta (a sinistra), selezionare se applicare il singolo intervento o meno. Si possono così valutare diverse strategie da applicare in base al budget di partenza o ai massimali del bonus applicato. In fondo sono visualizzabili l'importo lavori e, dopo aver definito una percentuale di spese tecniche, il totale di spesa computata.

Questa impostazione del foglio permette massima flessibilità, potendo visualizzare i totali per singolo intervento, categoria e complessivi, e avendo la possibilità di includere o escludere ogni categoria e sub-categoria dal totale.

| INTERVENTO | COSTO TOTALE STIMATO ⁽¹⁾ | ALIQUOTA DETRAZIONE | SOMMA MASSIMA DETRAIBILE | NUMERO UNITA' IMMOBILIARI | SPESA MASSIMA AGEVOLABILE PER INTERVENTO | SPESA COMPUTATA |
|--|-------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|--|-----------------|
| OPERE PROVVISORIALI | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> ISOLAMENTO INVOLUCRO | 0 € | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> CAPPOTTO | 166.000 € | 110% | 484.000 € | 12 | 440.000 € | 0 € |
| <input checked="" type="checkbox"/> SOTTOTETTO | 0 € | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> PILOTIS | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> COPERTURA | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> PAVIMENTO | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> BALCONI | 0 € | | | | | |
| SPESA PROFESSIONALI | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> INTERVENTI IMPIANTISTICI | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> SOSTITUZIONE GENERATORI AUTONOMI | 0 € | 110% | 242.000 € | 12 | 220.000 € | 0 € |
| <input checked="" type="checkbox"/> IMPIANTO IBRIDO | 67.600 € | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> RIQUALIFICAZIONE C.T. | 36.000 € | | | | | |
| SPESA PROFESSIONALI | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> INTERVENTI INVOLUCRO TRASPARENTE | 0 € | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> SOST. INFISSI | 0 € | 110% | 719.994 € | 12 | 654.540 € | 0 € |
| <input checked="" type="checkbox"/> AVVORGIBILI E CASSONETTO | 0 € | | | | | |
| SPESA PROFESSIONALI | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> INTERVENTI SCHERMATURE O OSCURANTI | 0 € | | | | | |
| SCHERMATURE | 0 € | 110% | 719.994 € | 12 | 654.540 € | 0 € |
| SPESA PROFESSIONALI | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> FOTOVOLTAICO | 0 € | | | | | |
| IMP FOTOVOLTAICO | 90.000 € | 110% | 132.000 € | 50 kW | 120.000 € | 0 € |
| SPESA PROFESSIONALI | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> ACCUMULO | 0 € | | | | | |
| ACCUMULO | 41.600 € | 110% | 82.830 € | 75,3 kWh | 75.300 € | 0 € |
| SPESA PROFESSIONALI | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> COLONNINE ELETTRICHE | 0 € | | | | | |
| COLONNINE ELETTRICHE | 2.800 € | 110% | 26.400 € | 12 | 24.000 € | 0 € |
| SPESA PROFESSIONALI | 0 € | | | | | |
| <input type="checkbox"/> BUILDING AUTOMATION | 0 € | | | | | |
| BACS | 0 € | 110% | 179.995 € | 12 | 163.632 € | 0 € |
| SPESA PROFESSIONALI | 0 € | | | | | |
| Importo lavori al netto | 0 € | | | | | 0 € |
| SPESA TECNICHE +IVA | 0 € | | | | | |

Figura 4.4: Schermata di riepilogo del computo metrico estimativo

5. SVILUPPO DELLO STRUMENTO DI CALCOLO

Per poter applicare il modello realizzato nel presente lavoro di tesi in modo efficace, è stato sviluppato uno strumento utilizzabile da professionisti del settore, implementato in fogli di calcolo Microsoft Excel che vedremo nel dettaglio in questo capitolo.

5.1. Architettura del foglio di calcolo

Lo strumento si compone di nove fogli, di cui quattro saranno nascosti all'utente perché costituiscono il "core" dell'architettura. Il file nel complesso sarà bloccato per evitare che l'utente modifichi formule o altri elementi essenziali per il corretto funzionamento dello stesso.



FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO

| | | | | | |
|-----------------------|--|--|---|--|--|
| DATI GENERALI | CODICE <input type="text" value="30090"/> | CITTÀ <input type="text" value="TORINO"/> | INDIRIZZO <input type="text" value="VIA IMPIANTI SPORTIVI 19"/> | ANNO <input type="text" value="1981"/> |  |
| | ZONA <input type="text" value="E"/> | GG <input type="text" value="2617"/> | N° UNITA ABITATIVE <input type="text" value="1"/> | PERTINENZE <input type="text" value="6"/> | |
| DATI GEOMETRICI | PERIMETRO <input type="text" value="43,2 m"/> | N° VANI SCALA <input type="text" value=""/> | DIMENSIONI VANO <input type="text" value="x"/> | MODULO <input type="text" value="D"/> | |
| | AREA <input type="text" value="116,64 m²"/> | N° PIANI <input type="text" value="1"/> | ALTEZZA PIANO TIPO <input type="text" value="3 m"/> | DIREZIONE <input type="text" value="N"/> | |
| INVOLUCRO OPACO | MURATURA <input type="text" value="Muratura a cassavuota con mattoni forati"/> | | N° BALCONI <input type="text" value=""/> | DIMENSIONI <input type="text" value="x"/> | A _{netta} <input type="text" value="100,00 m²"/> |
| | SPESSORE <input type="text" value="40 cm"/> | U _{op} <input type="text" value="1,119 W/m²K"/> | OMBREGGIAMENTI <input type="text" value=""/> | f _{sh} <input type="text" value="1,000"/> | U* _{op} <input type="text" value="0,829 W/m²K"/> |
| | FACCIAE NON DISPERDENTI <input type="text" value=""/> | COLORE <input type="text" value="Medio"/> | α <input type="text" value="0,6"/> | f _{irr,op} <input type="text" value="1,525"/> | A _{op} <input type="text" value="155,95 m²"/> |
| SOLAIO SUPERIORE | TIPOLOGIA COPERTURA <input type="text" value="A falde"/> | STRATIGRAFIA <input type="text" value="Solaio latero-cementizio"/> | | U _r <input type="text" value="1,909"/> | U* _r <input type="text" value="1,694 W/m²K"/> |
| | SOTTOTETTO <input type="text" value="Non_riscaldato"/> | b _{tr,r} <input type="text" value="0,90"/> | A _r <input type="text" value="116,64 m²"/> | | |
| SOLAIO INFERIORE | ATTACCO A TERRA <input type="text" value="Cantine"/> | STRATIGRAFIA <input type="text" value="Solaio latero-cementizio"/> | | U _f <input type="text" value="1,273"/> | U* _f <input type="text" value="1,1 W/m²K"/> |
| | | | b _{tr,f} <input type="text" value="0,80"/> | A _f <input type="text" value="116,64 m²"/> | |
| INVOLUCRO TRASPARENTE | TIPOLOGIA DI FINESTRA <input type="text" value="PVC - Vetro Singolo"/> | F1 (100x150mm) | OSCURANTI <input type="text" value="Avvolgibili"/> | U* _w <input type="text" value="3,667 W/m²K"/> | |
| | U _w <input type="text" value="5 W/m²K"/> | g _{gl} <input type="text" value="0,85"/> | f _{irr,w} <input type="text" value="1,336"/> | A _w <input type="text" value="0,00 m²"/> | |
| | FACCIAE SENZA FINESTRE <input type="text" value=""/> | SCHERMATURE <input type="text" value=""/> | INFERRIATE <input type="checkbox"/> | g* _{gl} <input type="text" value="0,839"/> | |
| IMPIANTO | <input checked="" type="checkbox"/> CENTRALIZZATO <input checked="" type="checkbox"/> AUTONOMO <input type="checkbox"/> ACS COMBINATA <input checked="" type="checkbox"/> FOTOVOLTAICO | | | | |
| | TERMINALI EMISSIONE <input type="text" value="Radiatori su parete esterna"/> | P _{prog} <input type="text" value="13,22 kW"/> | η _{em} <input type="text" value="0,89"/> | η _g <input type="text" value="0,516"/> | |
| | REGOLAZIONE <input type="text" value="Manuale"/> | | η _{rg} <input type="text" value="0,82"/> | Vol <input type="text" value="300,00 m³"/> | |
| | GENERATORE <input type="text" value="Caldaia tradizionale atmosferica"/> | P _{in} <input type="text" value="15 kW"/> | η _{gen} <input type="text" value="0,769"/> | f _{GG} <input type="text" value="1,000"/> | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Installazione all'esterno <input type="checkbox"/> Antecedente al 1996 | | η _{dr} <input type="text" value="0,92"/> | f _{JEX} <input type="text" value="1,000"/> | |
| | <input type="checkbox"/> T _{media} in caldaia >65°C <input type="checkbox"/> | VEETTORE ENERGETICO <input type="text" value="GAS NATURALE"/> | | | |
| | N° PANNELLI ESPOSIZIONE <input type="text" value=""/> | EP _{nd} <input type="text" value="255,97 kWh/m²"/> | EP _{gl,ren} 243.8 G CARICA DATI | | |
| | VENTILAZIONE PANNELLI <input type="text" value=""/> | EP _{acs} <input type="text" value="19,99 kWh/m²"/> | | | |
| | | EP _{aux} <input type="text" value="2,30 kWh/m²"/> | | | |
| | | EP _{pv} <input type="text" value="0,00 kWh/m²"/> | | | |

Figura 5.1: Schermata di inserimento dati del tool

Il primo foglio, denominato "INPUT" costituisce l'interfaccia grafica dell'utente, in cui dovrà inserire tutti i dati richiesti; i dati potranno essere inseriti solo nelle celle bianche (Fig. 5.1) tramite apposito elenco a discesa o manualmente tramite tastiera, mentre le celle con colorazione giallo pallido sono calcolate automaticamente. Il foglio sfrutta una divisione a colori per individuare meglio le varie categorie di dati richiesti, dividendoli principalmente in quattro tipologie: dati generali; dati geometrici; dati dell'involucro edilizio; dati impiantistici. Le celle colorate in giallo acceso sono invece i dati "finali" che saranno utilizzati per il calcolo dell'indice di prestazione energetica (disponibile in fondo a destra del foglio). In base ai dati inseriti, potranno essere richiesti dati aggiuntivi o alcune celle potrebbero oscurarsi perché non pertinenti. Cliccando poi sul tasto "CARICA DATI", essi verranno inseriti automaticamente (tramite macro Excel) nel foglio "DB_OUT" che ha il ruolo di database dei dati acquisiti.

Nel foglio "DB_IN" saranno inseriti i dati degli immobili soggetti ad intervento, forniti dal cliente, come ad esempio il codice identificativo dell'immobile, l'indirizzo e la città di ubicazione (Fig. 5.2). Da questo foglio verranno estratti alcuni dei dati generali importanti come la località, fondamentale per definire i dati climatici necessari all'algoritmo di calcolo.

| CODICE | INDIRIZZO | COMUNE | ANNO | OR | MODULI | N° UNITà | N° piani |
|--------|-------------------------------|---------------------|------|------|--------|----------|----------|
| 30090 | VIA IMPIANTI SPORTIVI 28 | APPIGNANO | 1981 | N-S | A | 6 | 3 |
| 30100 | VIA IMPIANTI SPORTIVI 17 | APPIGNANO | 1981 | N-S | A | 6 | 3 |
| 90180 | VIA A. GARiboldi 9 | CASTELRAIMONDO | 1980 | NONE | A | 4 | 2 |
| 90190 | VIA G. PASTORE 4 | CASTELRAIMONDO | 1981 | NONE | C | 12 | 4 |
| 90220 | VIA XX SETTEMBRE 130 | CASTELRAIMONDO | N.D. | E-O | A | 4 | 2 |
| 120140 | VIA DEI CERQUATTI 90 | CINGOLI | 1984 | NONE | B | 12 | 3 |
| 120150 | VIA SPONTINI 11/A | CINGOLI | 1987 | N-S | B | 9 | 3 |
| 120170 | FRAZIONE TORRE 132 | CINGOLI | 1989 | NONE | A | 6 | 3 |
| 120180 | VIA DEI CERQUATTI 88 | CINGOLI | 1989 | N-S | A | 6 | 3 |
| 120190 | VIA DEI CERQUATTI 86 | CINGOLI | 1989 | NONE | B | 9 | 3 |
| 160060 | VIA GUIDO ROSSA 4 | ESANATOGLIA | 1987 | N-S | A | 6 | 3 |
| 240200 | VIA BOLDRINI 110 | MATELICA | 1954 | E-O | A | 4 | 2 |
| 240230 | VIA UMBERTO I 88/96 | MATELICA | 1964 | E-O | 0 | 5 | 2 |
| 240260 | VIA DON E. POCOGNONI, 3 | MATELICA | 1982 | NONE | B | 12 | 4 |
| 240270 | VIA DON E. POCOGNONI, 5 | MATELICA | 1984 | NONE | B | 14 | 4 |
| 240280 | VIA T. SABBATINI SC. A, B 9,7 | MATELICA | 1987 | N-S | A | 12 | 3 |
| 240280 | VIA T. SABBATINI SC. A, B 9,8 | MATELICA | 1988 | E-O | A | | 3 |
| 240290 | VIA CIGNA 4 | MATELICA | 1987 | NONE | C | 12 | 4 |
| 240310 | VIA T. SABBATINI 10 | MATELICA | 1989 | NONE | A | 6 | 3 |
| 240331 | LOC. CAVALIERI 408 | MATELICA | 2000 | N-S | 0 | 3 | 2 |
| 240360 | VIA DEL CROCFISSO 1 | MATELICA | 2004 | NONE | C | 9 | 3 |
| 470350 | VIA ALDO MORO, 6 | SAN SEVERINO MARCHE | 1978 | E-O | A+A | 8 | 2 |
| 470360 | VIA ALDO MORO 1, 3 | SAN SEVERINO MARCHE | 1978 | E-O | D+A+A | 14 | 2 |

Figura 5.2: Esempio di database del parco immobiliare analizzato

Il foglio "DATI CLIMATICI" è il database delle località italiane inserite, dove si possono trovare tutti i dati climatici utilizzati per i calcoli dell'algoritmo. Con riferimento alla figura 5.3, da sinistra verso destra troviamo:

- zona climatica della località;
- gradi giorno della località;
- temperatura interna di progetto;
- temperatura esterna di progetto
- temperatura media esterna annuale;
- irradiazione solare stagionale nella direzione Nord, Nord-Est..., Nord-Ovest;
- Irradiazione solare stagionale sul piano orizzontale;
- fattore correttivo dei gradi giorno;
- fattore correttivo dell'extra-flusso.

| QTY | ZONA | GG | T _{int,p} | T _{e,p} | T _{med,e} | N | NE | E | SE | S | SO | O | NO | OR | EX | f _{GG} | f _{EX} |
|---------------------|------|------|--------------------|------------------|--------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-----------------|-----------------|
| TORINO | E | 2617 | 20 °C | -8 °C | 12,6 °C | 467,8 | 608,5 | 1031 | 1447,5 | 1656,3 | 1447,5 | 1031 | 608,5 | 1378,8 | 8916 | 1,00 | 1,00 |
| PARMA | E | 2502 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9161 | 0,956 | 1,027 |
| GENOVA | D | 1435 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9161 | 0,548 | 1,027 |
| PIACENZA | E | 2715 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9161 | 1,037 | 1,027 |
| REGGIO EMILIA | E | 2560 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9161 | 0,978 | 1,027 |
| APPIGNANO | D | 1879 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9161 | 0,718 | 1,027 |
| CASTELRAIMONDO | D | 1999 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 555,1 | 944,1 | 1309,2 | 1490,6 | 1309,2 | 944,1 | 555,1 | 1279,4 | 9293 | 0,764 | 1,042 |
| CINGOLI | E | 2282 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 466 | 625,2 | 1081,2 | 1498,9 | 1708,9 | 1498,9 | 1081,2 | 625,2 | 1457,9 | 10355 | 0,872 | 1,161 |
| ESANATOGLIA | E | 2161 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 466 | 625,2 | 1081,2 | 1498,9 | 1708,9 | 1498,9 | 1081,2 | 625,2 | 1457,9 | 10236 | 0,826 | 1,148 |
| GAGLIOLE | E | 2206 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | | | | | | | | | | | 0,843 | 0,000 |
| MATELICA | D | 2054 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9253 | 0,785 | 1,038 |
| SAN SEVERINO MARCHE | D | 1915 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9269 | 0,732 | 1,040 |
| TREIA | D | 2040 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9262 | 0,78 | 1,039 |
| CIVITANOVA MARCHE | D | 1643 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9262 | 0,628 | 1,039 |
| MONTECOSARO | D | 1934 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9262 | 0,739 | 1,039 |
| MONTELUPO | D | 1958 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9262 | 0,748 | 1,039 |
| MORROVALLE | D | 1995 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9262 | 0,762 | 1,039 |
| PORTO RECANATI | D | 1647 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9262 | 0,629 | 1,039 |
| POTENZA PICENA | D | 1917 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9262 | 0,733 | 1,039 |
| RECANATI | D | 1982 | 20 °C | -1,2 °C | 15,1 °C | 413,3 | 552,1 | 946,9 | 1315,3 | 1499,8 | 1315,3 | 946,9 | 552,1 | 1279,4 | 9262 | 0,757 | 1,039 |

Figura 5.3: Database dei dati climatici

Nel caso non sia presente la località desiderata nel database è possibile definire i dati climatici di una nuova nel foglio "CALC_DC" (Fig. XX),

| LOCALITA | ZONA | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| TORINO | E | 31 | 28 | 31 | 15 | | | | | | 17 | 30 | 31 | |
| Descrizione | u.m. | GEN | FEB | MAR | APR | MAG | GIU | LUG | AGO | SET | OTT | NOV | DIC | |
| radiazione solare Nord | [MJ/m ²] | 1,7 | 2,7 | 3,6 | 5,1 | 7,8 | 9,7 | 9,6 | 6,9 | 4,5 | 3 | 1,9 | 1,4 | 467,8 |
| radiazione solare Nord-Est | [MJ/m ²] | 1,8 | 3,3 | 5,3 | 7,9 | 10,5 | 12,5 | 13 | 10,3 | 6,9 | 4 | 2,1 | 1,5 | 608,5 |
| radiazione solare Est | [MJ/m ²] | 3,7 | 5,9 | 8,5 | 11,1 | 12,9 | 14,7 | 15,7 | 13,7 | 10,4 | 6,7 | 3,6 | 3,2 | 1031 |
| radiazione solare Sud-Est | [MJ/m ²] | 6,4 | 8,5 | 10,7 | 11,7 | 12 | 12,8 | 13,9 | 13,6 | 11,9 | 9 | 5,6 | 5,9 | 1447,5 |
| radiazione solare Sud | [MJ/m ²] | 8,1 | 10,1 | 11,2 | 10,5 | 9,9 | 10,2 | 11 | 11,5 | 11,6 | 10,3 | 6,9 | 7,6 | 1656,3 |
| radiazione solare Sud-Ovest | [MJ/m ²] | 6,4 | 8,5 | 10,7 | 11,7 | 12 | 12,8 | 13,9 | 13,6 | 11,9 | 9 | 5,6 | 5,9 | 1447,5 |
| radiazione solare Ovest | [MJ/m ²] | 3,7 | 5,9 | 8,5 | 11,1 | 12,9 | 14,7 | 15,7 | 13,7 | 10,4 | 6,7 | 3,6 | 3,2 | 1031 |
| radiazione solare Nord-Ovest | [MJ/m ²] | 1,8 | 3,3 | 5,3 | 7,9 | 10,5 | 12,5 | 13 | 10,3 | 6,9 | 4 | 2,1 | 1,5 | 608,5 |
| radiazione solare Orizz. Diffusa | [MJ/m ²] | 2,4 | 3,8 | 4,9 | 6,1 | 8,3 | 9,1 | 8,8 | 7,6 | 6 | 4,3 | 2,8 | 2 | 1378,8 |
| radiazione solare Orizz. Diretta | [MJ/m ²] | 2,2 | 3,9 | 6,8 | 9,9 | 11,4 | 13,7 | 15,2 | 12,6 | 8,6 | 4,7 | 2 | 1,9 | |
| temperatura media | [°C] | 1,2 | 3,1 | 8,3 | 11,9 | 18 | 22,1 | 23,6 | 22,6 | 19,1 | 12,3 | 6,8 | 2,6 | 12,6 |
| pressione del vapore | [Pa] | 555,1 | 614,8 | 883,6 | 929,5 | 1348,8 | 1608,8 | 1577,1 | 1994,1 | 1651,5 | 1174,3 | 920,4 | 650,6 | |
| | | 1561,47 | 1459,64 | 1541,32 | 938,55 | | | | | | 783,53 | 1195,5 | 1435,61 | 8916 |

Figura 5.4: Schermata di inserimento dati climatici

Nelle celle blu si inserisce il nome del comune e la zona climatica di appartenenza, in quelle bianche, invece, vanno inseriti i dati richiesti a sinistra; essi possono essere ottenuti utilizzando la normativa UNI 10349-1 oppure copiati da un software di simulazione come EC700 (attualmente consigliato). Le celle in giallo sono calcolate e costituiranno i dati finali che verranno inseriti nel database cliccando sul pulsante "INSERISCI". Attualmente questo processo è macchinoso ma in futuro verrà implementato un database completo di tutte le località italiane.

5.2. Implementazione del modello

In questo capitolo verranno spiegati i vari dati di ingresso richiesti nell'interfaccia grafica e le formule utilizzate per calcolare i vari fattori; vengono anche riportate le tabelle su cui si basano i valori visualizzati.

1) Dati generali e geometrici

Viene richiesto come primo dato il codice dell'edificio - precedentemente definito nel foglio "DB_IN" - che potrà essere selezionato da un menu a discesa, e su cui si basano gli altri dati che verranno cercati nei vari database e visualizzati.

| | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|----------------------|--------|---------------------------|--------------------------|-------------------|------|
| CODICE | 30090 | CITTÀ | TORINO | INDIRIZZO | VIA IMPIANTI SPORTIVI 19 | ANNO | 1981 |
| ZONA | E | GG | 2617 | N° UNITÀ ABITATIVE | 1 | PERTINENZE | 6 |
| PERIMETRO | 43,2 m | N° VANI SCALA | | DIMENSIONI VANO | × | MODULO | D |
| AREA | 116,64 m ² | N° PIANI | 1 | ALTEZZA PIANO TIPO | 3 m | DIREZIONE | N |



Figura 5.5: Schermata dati generali

Successivamente si richiedono:

- n_{UI} Il numero di unità abitative;
- Il numero di pertinenze, ovvero eventuali cantine o garage accatastati che serviranno nel caso di applicazione di bonus fiscali;
- P_{lordo} (m) Il perimetro a filo esterno del fabbricato, escluse eventuali pareti non disperdenti;
- A_{lorda} (m²) l'area a filo esterno del fabbricato;
- n_{vs} il numero di vani scala presenti nell'edificio;
- l_{vs} , p_{vs} (m) la lunghezza e la profondità del vano scala;
- Il modulo dell'edificio associato a uno specifico tipo di geometria;

- n_p il numero di piani abitabili dell'edificio;
- h_p altezza del piano tipo;
- la direzione principale dell'edificio;

2) Involucro opaco

Il primo dato da inserire è la tipologia di muratura che compone l'involucro edilizio (Tabella 5.1) e il relativo spessore, ad essa sarà associato un valore di trasmittanza termica e di trasmittanze lineiche dei ponti termici

| | | | | | | | |
|--------------------------------|--|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| MURATURA | Muratura a cassavuota con mattoni forati | N° BALCONI | 1 | DIMENSIONI | 2 m × 3 m | A_{netta} | 100,00 m ² |
| SPESSORE | 40 cm | U_{op} | 1,119 W/m ² K | OMBREGGIAMENTI | Vegetazione fitta | f_{sh} | 0,880 |
| FACCIAE NON DISPERDENTI | N | COLORE | Medio | α | 0,6 | f_{irr,op} | 1,465 |
| | | | | | | A_{op} | 155,95 m ² |

Figura 5.6: Schermata dati involucro opaco

Successivamente si richiedono:

- n_{bal} il numero di balconi presenti nell'edificio;
- l_{bal} , p_{bal} (m) la lunghezza e la profondità del balcone tipo;
- Il tipo di ombreggiatura presente attorno all'edificio (Tabella 2.15);
- Il colore delle facciate, a cui si associa un valore di alfa;
- la direzione di esposizione delle facciate non disperdenti.

| | TIPOLOGIA | s [cm] | U _{op} [W/m ² K] | Ψ _{tel} [W/mK] | Ψ _{bal} [W/mK] | Ψ _{sol} [W/mK] |
|-----------|--|--------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| M1 | Muratura in mattoni pieni | 38 | 1,55 | 0,164 | 0,312 | 0,454 |
| M2 | Muratura a cassavuota con mattoni forati | 40 | 1,119 | 0,168 | 0,385 | 0,553 |
| M3 | Muratura in mattoni forati | 40 | 1,327 | 0,128 | 0,342 | 0,51 |
| M4 | Muratura a cassavuota mattoni pieni e forati | 40 | 1,286 | 0,15 | 0,35 | 0,522 |
| M5 | Muratura di pietra intonacata | 45 | 2,305 | 0,295 | 0,108 | 0,158 |

Tabella 5.1: Murature implementate nello strumento

Si possono aggiungere altre tipologie di muratura facilmente ad ogni utilizzo.

| COLORI | α |
|--------|-----|
| Scuro | 0,9 |
| Medio | 0,6 |
| Chiaro | 0,3 |

Tabella 5.2: Valori del fattore di assorbimento solare

| DATI | VALORI |
|---------------------|------------------------|
| U _{cass} | 6 W/m ² K |
| S _{cass} | 20 cm |
| S _{solaio} | 30 cm |
| U _{vs} | 1,5 W/m ² K |
| S _{vs} | 20 cm |

Tabella 5.3: Valori di trasmittanze e spessori utilizzati

| Spessore [cm] | f_n |
|---------------|---------|
| 25 | 0,90703 |
| 30 | 0,89 |
| 35 | 0,87344 |
| 40 | 0,85734 |
| 45 | 0,84168 |

Tabella 5.4: Valori del fattore di riduzione della superficie utile

L'area netta è calcolata come:

$$A_{netta} = (A_{lorda} - n_{vs} \cdot (l_{vs} + s_{vs}) \cdot (p_{vs} + s_{vs})) \cdot f_n \quad [m^2] \quad (5.1)$$

dove f_n è il fattore di riduzione che tiene conto dello spessore delle pareti.

La trasmittanza U_{op}^* è calcolata come nell'Eq.2.11 del capitolo 2. Mentre la superficie dell'involucro opaco è:

$$A_{op} = \{(P_{lordo} - l_{vs}) \cdot [n_p \cdot h_p + s_{pav} + s_{cop} + (n_p - 1) \cdot s_{sol}]\} - A_w \quad [m^2] \quad (5.2)$$

$$A_m = A_{op} - A_{cas} \quad [m^2] \quad (5.3)$$

Il fattore $f_{irr,op}$ è calcolato secondo l'Eq. 2.24.

3) Solaio superiore

Si richiede inizialmente l'inserimento della tipologia di copertura, in base alla scelta verranno richiesti dati diversi (Tabella 5.5). Si inserisce successivamente il tipo di solaio superiore e, se la copertura è a falde, l'inclinazione della stessa.

Figura 5.7: Schermata dati solaio superiore

Ad ogni stratigrafia sono associati i valori di trasmittanza termica, di spessore, e di trasmittanze lineiche rispetto alla muratura scelta in precedenza.

| COPERTURA | SOTTOTETTO | $b_{tr,r}$ | CODICE | TIPOLOGIA |
|-----------|----------------|------------|--------|-----------------------------|
| A falde | Riscaldato | 0,9 | S1 | Solaio latero-cementizio |
| | | 0,9 | S2 | Solaio in legno di abete |
| | Non riscaldato | 1,00 | S3 | Copertura latero-cementizia |
| Piana | | 1,00 | S3 | Copertura latero-cementizia |

Tabella 5.5: Tipologie di solai superiori

| CODICE | s [cm] | U_r [W/m ² K] | Ψ_{M1} [W/mK] | Ψ_{M2} [W/mK] | Ψ_{M3} [W/mK] | Ψ_{M4} [W/mK] | Ψ_{M5} [W/mK] |
|--------|--------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| S1 | 26 | 1,909 | -0,604 | -0,58 | -0,603 | -0,598 | -0,78 |
| S2 | 4 | 1,875 | 0,692 | -0,704 | -0,717 | -0,714 | -0,841 |
| S3 | 30 | 1,975 | -0,573 | -0,656 | -0,604 | -0,627 | -0,837 |

Tabella 5.6: Caratteristiche solai superiori

La superficie del solaio viene così calcolata

$$A_r = \frac{A_{netta}}{f_n} \cdot \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad [\text{m}^2] \quad (5.4)$$

4) Solaio inferiore

Similmente a quanto detto per il solaio superiore, si richiede dapprima la tipologia di attacco a terra, successivamente potranno essere richiesti diversi dati (Tabella 5.7 e Tabella 5.8). Nel caso di Pilotis verranno richiesti:

- A_c la superficie delle cantine;
- P_c il perimetro delle cantine;

Figura 5.8: Schermata solai inferiori

| ATTACCO A TERRA | $b_{tr,f}$ | CODICE | TIPOLOGIA |
|-----------------|------------|--------|--------------------------|
| Cantine | 0,8 | P1 | Solaio latero-cementizio |
| | 0,8 | P3 | Solaio in legno |
| Contro terra | - | P2 | Solaio contro terra |
| Pilotis | 1,00 | P1 | Solaio latero-cementizio |
| | 1,00 | P3 | Solaio in legno |

Tabella 5.7: Tipologie solai inferiori

| CODICE | s [cm] | U_f [W/m ² K] | Ψ_{M1} [W/mK] | Ψ_{M2} [W/mK] | Ψ_{M3} [W/mK] | Ψ_{M4} [W/mK] | Ψ_{M5} [W/mK] |
|--------|--------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| P1 | 35 | 1,273 | -0,521 | -0,467 | -0,5 | -0,496 | -0,718 |
| P2 | 14 | 0,548 | -0,542 | -0,54 | -0,554 | -0,551 | -0,692 |
| P3 | 13 | 1,257 | -0,544 | -0,544 | -0,557 | -0,554 | -0,692 |

Tabella 5.8: Caratteristiche solai inferiori

La superficie del solaio inferiore è calcolata come:

$$A_f = \frac{A_{netta}}{f_n} \quad [\text{m}^2] \quad (5.5)$$

E nel caso di Pilotis il $b_{tr,f}$ è:

$$b_{tr,f} = \frac{0,9 \cdot A_{cantine} + 1 \cdot A_{pilotis}}{A_f} \quad [-] \quad (5.6)$$

5) Involucro trasparente

| | | | | | | |
|------------------------|----------------------|----------------|-----------|-------------|-----------|--------------------------|
| TIPOLOGIA DI FINESTRA | PVC - Vetro Singolo | F1 (100x150mm) | OSCURANTI | Avvolgibili | U^*,w | 3,667 W/m ² K |
| U,w | 5 W/m ² K | g,gl | | | f,irr,w | 1,284 |
| | | | | | A,w | 0,00 m ² |
| FACCIAE SENZA FINESTRE | | SCHERMATURE | | INFERRIATE | g^*,gl | 0,839 |

Figura 5.9: Schermata dati involucro trasparente

Vengono richiesti:

- La tipologia di componente finestrato (Tabella 5.11);
- n_{Fx} Il numero di finestra di tipo F1,F2,F3,PF (Tabella 5.9);
- La tipologia di eventuali chiusure oscuranti (Tabella 5.10);
- La tipologia di eventuali schermature (Tabella 5.12);
- L'esposizione delle facciate prive di componenti finestrati;

| INFISSO | l_F [cm] | h_F [cm] |
|----------------|------------|------------|
| F1 (100x150mm) | 100 | 150 |
| F2 (60x150mm) | 60 | 150 |
| F3 (100x150mm) | 100 | 150 |
| PF (150x270mm) | 100 | 150 |

Tabella 5.10: Tipologie di serramenti

| TIPOLOGIA | U_{film} [W/m ² K] | U_g [W/m ² K] | U_w [W/m ² K] | g_{gl} |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|
| Legno - Vetro Singolo | 2,00 | 5,70 | 5,00 | 0,85 |
| Legno - Vetro Doppio | 2,00 | 3,10 | 3,00 | 0,75 |
| Metallo - Vetro Singolo | 7,00 | 5,70 | 6,00 | 0,85 |
| Metallo - Vetro Doppio | 7,00 | 3,10 | 3,90 | 0,75 |
| Metallo TT - VS | 2,50 | 5,70 | 5,10 | 0,85 |
| Metallo TT - VD | 2,50 | 3,10 | 3,20 | 0,75 |
| PVC - Vetro Singolo | 2,20 | 5,70 | 5,00 | 0,85 |
| PVC - Vetro Doppio | 2,20 | 3,10 | 3,10 | 0,75 |

Tabella 5.9: Caratteristiche serramenti

| OSCURANTI | $R_{osc} [(m^2K)/W]$ |
|-------------|----------------------|
| Avvolgibili | 0,16 |
| Persiane | 0,22 |

Tabella 5.11: Tipologia oscuranti

| SCHERMATURE | f_{sh} |
|-------------------|----------|
| Tende interne | 0,8 |
| Tende esterne | 0,75 |
| Veneziane interne | 0,3 |
| Veneziane esterne | 0,15 |

Tabella 5.12: Tipologia schermature

La superficie vetrata è così calcolata:

$$A_w = \sum_{j=1}^n n_{F,j} \cdot l_{F,j} \cdot h_{F,j} \quad [m^2] \quad (5.7)$$

E il perimetro dei componenti finestrati:

$$P_w = \sum_{j=1}^n n_{F,j} \cdot 2 \cdot (l_{F,j} + h_{F,j}) \quad [m] \quad (5.8)$$

Mentre l'area degli eventuali cassonetti è:

$$A_{cas} = \sum_{j=1}^n n_{F,j} \cdot l_{F,j} \cdot 0,2 \quad [m^2] \quad (5.9)$$

dove si considerano 20 cm di altezza del cassonetto.

6) Dati impiantistici

| | | | |
|---|--|---|---------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> CENTRALIZZATO | <input checked="" type="checkbox"/> AUTONOMO | <input checked="" type="checkbox"/> ACS COMBINATA | <input type="checkbox"/> FOTOVOLTAICO |
| TERMINALI EMISSIONE | Radiatori su parete esterna | P_{prog} | 14,3 kW |
| REGOLAZIONE | Manuale | η_{em} | 0,89 |
| GENERATORE | Caldaia tradizionale pressurizzata | η_{rg} | 0,82 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Installazione all'esterno | | P_{in} | 15 kW |
| <input type="checkbox"/> T_{media} in caldaia >65°C | | η_{gen} | 0,847 |
| | | η_{dr} | 0,92 |
| | | η_{g} | 0,569 |
| | | VETTORE ENERGETICO | GAS NATURALE |
| | | Vol | 300,00 m ³ |
| | | fGG | 1,000 |
| | | fEX | 1,000 |

Figura 5.10: Schermata dati impiantistici

I dati e le formule usate sono tutti spiegati nel Capitolo 3 del presente lavoro, si rimanda ad esso per approfondimenti.

6. CONCLUSIONI

L'attuale lavoro di tesi fornisce un soddisfacente modello e strumento, per il calcolo dell'indice di prestazione energetica, sia prima, che dopo l'applicazione degli interventi di riqualificazione.

Il modello rispetta i canoni di modellazione energetica stazionaria che si utilizzano per la stima della classe energetica di un edificio, nei limiti del campo di applicabilità definito. Esso rispetta gli obiettivi del lavoro, utilizzando pochi dati di ingresso e ottenendo comunque risultati con un errore minimo.

Lo strumento è stato ideato in modo da essere di facile utilizzo, pensato proprio per effettuare studi di fattibilità tecnico-economica di parchi immobiliari estesi con buona approssimazione sui costi di intervento. Nonostante la sua semplicità all'apparenza, lo strumento racchiude un dettagliato algoritmo di calcolo che si affina con il miglioramento dei dati di ingresso, infatti, esso è in grado di implementare database sempre più accurati, frutto dell'esperienza dei professionisti che lo utilizzeranno.

In qualsiasi momento si potranno cambiare i valori di riferimento, nella schermata di sviluppo per adattare il foglio di calcolo alle specifiche esigenze lavorative. Si potrebbe ulteriormente implementare per tenere conto di altre casistiche di edifici più complessi.

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] M. Compierchio, «Sviluppo di un algoritmo di calcolo per la stima speditiva del fabbisogno energetico di edifici residenziali,» 2019.
- [2] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI/TS 11300-1, Prestazioni energetiche degli edifici,» in *Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale*, 2014.
- [3] Lovaglio, Analisi di regressione, 2006.
- [4] Edilclima Engineering & Software, [Online]. Available: <https://www.edilclima.it/>.
- [5] Microsoft Excel, Microsoft Corporation, [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/it-it/microsoft-365/excel>.
- [6] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI 10349-1, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici,» in *Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradiazione solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradiazione solare su di una superficie inclinata*, 2016.
- [7] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI EN 12831-1, Prestazione energetica degli edifici,» in *Metodo per il calcolo del carico termico di progetto - Parte 1: Carico termico per il riscaldamento degli ambienti, Modulo M3-3*, 2018.
- [8] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI/TS 11300-4, Prestazioni energetiche degli edifici,» in *Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria*, 2016.
- [9] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI/TS 11300-5, Prestazioni energetiche degli edifici,» in *Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili*, 2016.
- [10] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN ISO 6946, Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo, 2018.
- [11] Ministero dello sviluppo economico, «Linee guida nazionali per l'attestazione della prestazione energetica degli edifici,» in *ALLEGATO 1: criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici*, 26.06.2015.
- [12] Tianzhen Hong, Mary Ann Piette, Yixing Chen, Sang Hoon Lee, Sarah C. Taylor-Lange, Rongpeng Zhang, Kaiyu Sun e Phillip Price, «Commercial

Building Energy Saver: An energy retrofit analysis,» *Applied Energy* 159, p. 298–309, 2015.

[13] V. Corrado, I. Ballarini e S. P. Corgnati, National scientific report on the TABULA activities in Italy, Torino: Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, 2012.

[14] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI/TS 11300-2, Prestazioni energetiche degli edifici,» in *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*, 2019.

[15] V. Corrado e I. Ballarini, Assessment of energy flows related to buildings and technical building systems, 2020.