



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea Triennale in:**  
**INGEGNERIA EDILE**

Tesi di Laurea:

**Calibrazione di modelli energetici  
dinamici di edifici tramite algoritmi  
genetici: un caso di studio.**

*Calibrating dynamic building energy models  
using genetic algorithms: a case study.*

Relatore:  
Prof.ssa Elisa Di Giuseppe

Candidato:  
Mattia Maramonti

Correlatore:  
Prof. Gianluca Maracchini

*Anno Accademico 2019 - 2020*



# INDICE

1. INTRODUZIONE .....	1
2. STATO DELL'ARTE .....	5
3. FASI, MATERIALI E METODI .....	9
3.1. FASI OPERATIVE.....	9
3.2. MATERIALI.....	11
3.3. METODI E PROCEDURE DI CALCOLO .....	18
3.3.1. Modellazione dell'edificio.....	18
3.3.2. Modellazione interno 2.....	21
3.3.3. Definizione delle condizioni climatiche.....	23
3.3.4. Conteggio dei consumi .....	24
3.3.5. Analisi energetica, confronto in regime stazionario e dinamico .....	28
3.3.6. Parametrizzazione del modello dell'interno 2 in JEPlus .....	31
3.3.7. Ottimizzazione del modello tramite JE+EA.....	33
3.3.8. Calcolo dell'errore (JE+EA).....	35
4. RISULTATI .....	38
4.1. Confronto regime dinamico e regime permanente dei consumi ideali ...	38
4.2. Confronto del modello iniziale (interno 2).....	40
4.3. Individuazione dei settaggi per la calibrazione .....	42
4.4. Confronto del modello calibrato. ....	47

CONCLUSIONI .....	53
INDICE DELLE FIGURE.....	55
INDICE DEI GRAFICI .....	56
INDICE DELLE TABELLE .....	57
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA.....	59

# 1. INTRODUZIONE

Il problema ambientale è un argomento sempre più al centro della nostra quotidianità, soprattutto a causa dei fenomeni sempre più ricorrenti come i cambiamenti climatici, legati all'innalzamento della temperatura.

L'edilizia essendo uno dei settori produttivi con la percentuale più alta di emissioni di gas serra, chiamati anche GHG (GreenHouses Gases), è tra i maggiori responsabili di tali fenomeni. Negli ultimi anni si ha la volontà di ridurre le emissioni prodotte dai processi costruttivi e quelle generate durante il ciclo di vita dell'edificio, soprattutto dopo la pubblicazione del Protocollo di Kyoto, redatto nel 1997 ma valido dal 2005, a cui aderirono 191 Paesi da tutto il mondo, il cui obiettivo era quello di ridurre l'emanazione dei GHG del 5% (valido solo per gli stati industrializzati con valori di riferimento di gas serra nell'atmosfera riferiti a quelli misurati nel 1990).

L'Unione Europea si è rivelata la prima potenza politica a prendere posizione per favorire lo sviluppo sostenibile tramite l'introduzione di riforme, il cui obiettivo è quello di contrastare cambiamenti climatici e creare posti di lavoro. Una delle riforme più importanti è il "Piano 20-20-20" contenuto nel "Pacchetto Clima e Energia" che si suddivide in molteplici obiettivi, i quali:

- Abbattere le emissioni di gas a effetto serra della Comunità di almeno 20% entro il 2020 rispetto i valori del 1990. Per il 2050 è opportuno che le emissioni globali dei gas a effetto serra si riducano almeno della metà rispetto ai valori del 1990.
- Ridurre le emissioni prodotte da impianti, le quote di emissione assegnate a tali impianti dovrebbero essere, nel 2020, inferiori del 21% rispetto ai livelli di emissione registrati nel 2005.
- Aumentare le energie prodotte da fonti rinnovabili al fine di ricoprire il 20% del fabbisogno energetico entro il 2020 e del 27% entro il 2030.

L'edilizia, come detto in precedenza, è uno dei settori più impattanti in materia ed è proprio per questo che l'UE si sta muovendo per invertire questa tendenza con l'introduzione di vincoli dettati da direttive Europee, al fine di ridurre il fabbisogno energetico degli edifici ed i conseguenti gas a effetto serra. In particolare i riferimenti normativi più importanti sono:

- Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del consiglio (EPBD): il fine è quello di incentivare il miglioramento del rendimento energetico degli edifici all'interno della Comunità Europea; introducendo requisiti minimi di rendimento energetico ad edifici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazione, e definendo a livello nazionale un metodo di calcolo per il rendimento energetico.
- Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del consiglio (EPBD recast): è un aggiornamento della direttiva precedente con l'aggiornamento dei requisiti minimi e nuove metodologie di calcolo del rendimento energetico. Inoltre ai sensi dell'articolo 2, paragrafo 2, viene definito l'edificio ad energia quasi zero (detto nZEB) come: *“un edificio ad altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze”*.

Per permettere ed incentivare la riqualificazione dell'esistente in Italia sono stati stanziati dallo Stato numerosi incentivi per far sì che il nostro Paese possa raggiungere gli obiettivi imposti dall'UE. Detto ciò per garantire una riqualificazione energetica accurata, negli ultimi anni sono nati numerosi software di simulazione e supporto dell'indagine sulle misure di risparmio energetico. Ciò nonostante ancora oggi vi sono notevoli differenze tra i consumi reali e quelli di simulazione, che ne compromettono poi il lavoro successivo, ovvero quello di individuazioni di soluzioni progettuali che permettono di eseguire la riqualificazione energetica. È quindi importante studiare il comportamento energetico degli edifici su modelli detti calibrati, ovvero modelli che rappresentino la natura comportamentale di un edificio reale.

La calibrazione è definita dall'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) come “il processo di riduzione dell'incertezza del modello confrontando l'output del modello predetto in determinate condizioni con i dati misurati nelle stesse condizioni” [1]. Questo processo può essere eseguito tramite due approcci: uno manuale e uno automatico. In quest'ultimo caso, la corretta definizione dei parametri dell'algoritmo utilizzato risulta determinante per l'ottenimento del modello calibrato nel modo più accurato e veloce possibile. Tuttavia, non vi sono ad oggi studi scientifici in grado di fornire indicazione sul corretto set di valori da impiegare in caso di calibrazione di modelli energetici di edifici. L'obiettivo principale di questa tesi è quindi quello di analizzare l'impatto che hanno tali parametri sul risultato del processo di calibrazione.

A tal fine, è stato creato un modello energetico dinamico di un edificio plurifamiliare di cui si hanno a disposizione dati geometrici, proprietà fisiche (forniti dall'azienda Wave Srl), consumi energetici mensili relativi all'anno 2017 e relativi dati climatici relativi all'anno 2017, dai





## 2. STATO DELL'ARTE

La calibrazione del modello di un edificio sottoposto ad analisi energetica può essere eseguita tramite vari metodi di approccio, raggruppabili in due macro categorie: metodi manuali e metodi automatici. Nel paper “A review of methods to match building energy simulation models to measured data” redatto da D. Coakley, P. Raftery, and M. Keane [2], ci viene fornito una definizione dei due metodi prima citati:

- Manuali: questi approcci si basano prevalentemente su un processo iterativo e pragmatico del modellista o progettista. Questi approcci includono qualsiasi metodo che non utilizzi la modalità di calibrazione automatica attraverso metodi matematico / statistici.
- Automatici: approcci automatizzati possono essere descritti come una qualche forma di processo automatizzato (cioè non gestito dall'utente) per assistere o completare la calibrazione del modello.

L'approccio da noi utilizzato è quello automatico, tramite l'utilizzo dell'algoritmo NSGA-II, implementato nel software JEplus+EA (versione 1.7.2), il quale esegue l'ottimizzazione su una popolazione basata sugli individui da noi definibile tramite i parametri Population Size e Max. Generation, in cui i tre operatori genetici (crossover, mutatio e selection) permettono di eseguire l'ottimizzazione andando a minimizzare le funzioni di errore da noi scelte.

I due indici di controllo CVRMSE e NMBE rappresentano le funzioni di errore da minimizzare. Lo scopo dell'algoritmo è quello di eseguire il processo di calibrazione autonomamente andando solo a settare in fase preliminare dei parametri.

Nei seguenti articoli viene utilizzato il medesimo algoritmo per l'ottimizzazione dei loro modelli, in cui andremo ad evidenziare gli scopi della calibrazione e quali

settaggi dei parametri hanno scelto per effettuare la calibrazione. Le pubblicazioni analizzate sono le seguenti:

- “A performance comparison of multiobjective optimization-based approaches for calibrating white-box building energy models.” [3] in cui l'utilizzo del NSGA-II è relativo alla risoluzione dei problemi di progettazione per edifici ad energia quasi zero. In particolare viene eseguito un confronto fra più indici ed approcci di calibrazione. Per quanto riguarda i parametri di settaggio ci viene fornita solo un informazione relativa alla Population size, che nel caso specifico è consigliata pari a 2/4 volte il numero di variabili, in cui il numero dimensionale della calibrazione superi le 2000 simulazioni.
- “Multi-Objective Optimization for Energy Performance Improvement of Residential Buildings: A Comparative Study” [4] sfrutta l'algoritmo per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici residenziali, i parametri utilizzati sono i seguenti espressi in tabella:

**Tabella 2.1 Parametri NSGA-II**

Algoritmo	Parametri	Valore
NSGA-II	Maximum iteration	50
	Population size	20
	Crossover probability	0.9
	Mutation probability	0.5

- Application of a staged automated calibration methodology to a partially-retrofitted university building energy model, Journal of Building Engineering [5]. In questo caso l'algoritmo viene sfruttato per la calibrazione di un edificio universitario. I parametri di calibrazione o variabili del modello sono 25, mentre per quanto riguarda i settaggi

utilizzati, sono lasciati tutti quelli di default la Population size che è stata scelta pari a 30 (causa della disponibilità della CPU).

- Analysis of uncertainty indices used for building envelope calibration, Applied Energy [6]. I settaggi utilizzati sono quelli forniti dal software JEPlus+EA che prevede una Generazione di 200 e una Popolazione pari a 10, applicati su un modello parametrizzato avente 13 variabili.
- A performance comparison of multi-objective optimization-based approaches for calibrating white-box building energy models [7]. L'algoritmo è utilizzato per verificare un controllo di calibrazione di edifici "white-box". In particolare i parametri di calibrazione degli edifici sono 7, mentre i settaggi scelti per la dimensione della calibrazione sono: Population size 30, Generation 40.



## 3. FASI, MATERIALI E METODI

### 3.1. FASI OPERATIVE

Di seguito sono descritte brevemente le fasi operative:

- **MODELLAZIONE PRELIMINARE:** studio delle informazioni e dei dati posseduti sull'edificio oggetto di studio, ottenendo informazioni relative alla geometria, componenti finestrati e opachi, proprietà fisiche dei materiali e dei dati climatici; qualora le informazioni non siano presenti nei dati forniti da Wave Srl, saranno ipotizzate delle soluzioni in funzione dell'età dell'edificio.
- **MODELLAZIONE DELL'EDIFICIO:** la creazione del modello è eseguita in Desing Builder, riportando tutte le informazioni ricavate precedentemente.
- **SIMULAZIONE ENERGETICA IN REGIME DINAMICO:** la simulazione è eseguita sfruttando il motore fornito dal software Desing Builder, ovvero EnergyPlus, che ci permette di ottenere i consumi mensili per il servizio di riscaldamento di un generico anno.
- **CONFRONTO SIMULAZIONE ENERGETICA IN REGIME DINAMICO CON REGIME STAZIONARIO:** il confronto è necessario per verificare l'attendibilità del modello dinamico creato in Desing Builder partendo dagli stessi input statici utilizzati in Edil Clima. I dati di output sono confrontati tenendo in considerazione che i due software utilizzano due metodi di calcolo diversi. È perciò importante confrontare gli output in termini di ordine di grandezza.
- **MODELLAZIONE INTERNO 2:** sulla base del modello creato precedentemente in Desing Builder, si applicano delle modifiche relative all'occupazione, infiltrazione, e ventilazione, andando ad aggiungere dati

che prima erano stati semplificati per avere un confronto più diretto con Edil Clima. Una volta eseguite le modifiche all'intero edificio si passa all'analisi dei consumi, che verranno analizzati di un singolo interno, di cui disponiamo i consumi reali, i periodi di accensione dell'impianto e di occupazione dell'appartamento.

- **PARAMETRIZZAZIONE:** individuazione nei dati di input di parametri da poter variare in funzione delle loro proprietà.
- **CALIBRAZIONE E ANALISI DEI RISULTATI:** il modello è sottoposto ad un processo di ottimizzazione, che permette di ottenere diversi modelli, e di conseguenza anche diverse generazioni di dati di output. Ciò ci permette di analizzare ed individuare tra i risultati una o più soluzioni per il confronto diretto con i dati reali.

## 3.2. MATERIALI

L'edificio oggetto di studio è un condominio situato nel comune di Ancona, è stato realizzato intorno gli anni 70' ed è caratterizzato da 5 piani di cui uno interrato adibito a garages. I piani superiori sono composti da unità abitative, vano scale e nel piano terra abbiamo anche un locale utilizzato come centrale termica.



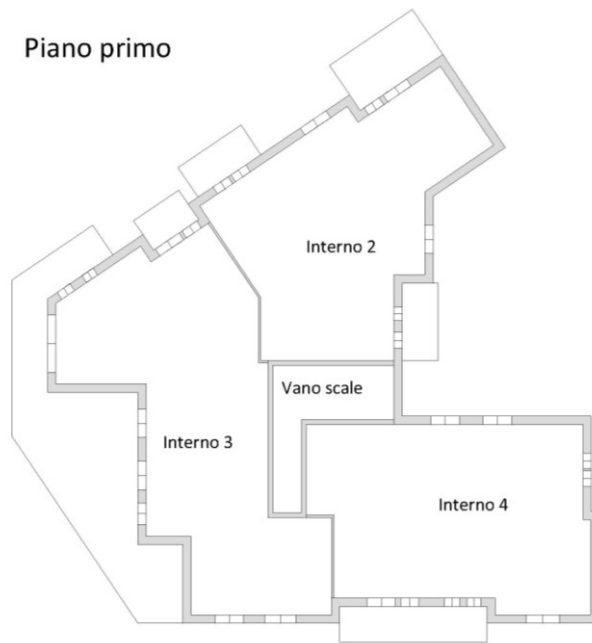
Figura 3.1 Edificio caso studio, estratto daGoogle Earth

Come detto in precedenza l'edificio è caratterizzato da più piani, in particolare, del piano interrato non abbiamo informazioni geometriche, mentre per i piani superiori ci sono state fornite da Wave Srl le piante in file formato CAD (fig. 2.3). Il primo piano è caratterizzato da un'unica unità abitativa di 128 mq. I piani superiori, primo secondo e terzo, hanno la stessa metratura pari a 320 mq, ma differiscono per la suddivisione interna delle unità abitative, ciascuno di essi ospita 3 abitazioni e un vano scala. L'ultimo piano, più piccolo degli altri, ospita solo due appartamenti e misura complessivamente 232mq. L'interno 2 sarà quello oggetto di calibrazione, avendo informazioni più dettagliate relative all'utilizzo dell'impianto.



**Figura 3.2** piante dell'edificio





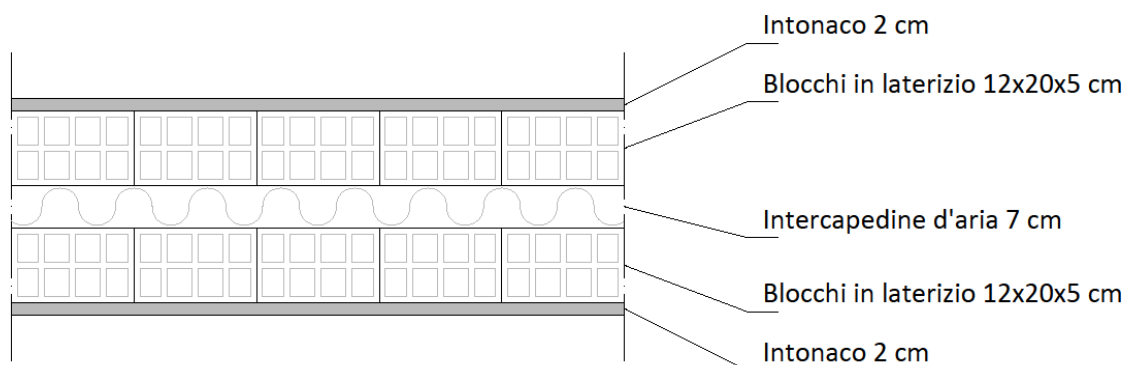
**Figura 3.3** Pianta piano primo e localizzazione dell'interno 2

Le informazioni forniteci sulle componenti opache della costruzione, quindi muri e solai, sono unicamente relative alla trasmittanza termica. Per questo motivo le loro stratigrafie sono state ipotizzate in funzione di spessori e anno di costruzione dell'edificio. Per i valori delle altre proprietà fisiche dell'elemento, calore specifico e densità, sono stati assegnati in funzione dei materiali scelti per la stratigrafia.

L'edificio può quindi essere scomposto nei seguenti elementi:

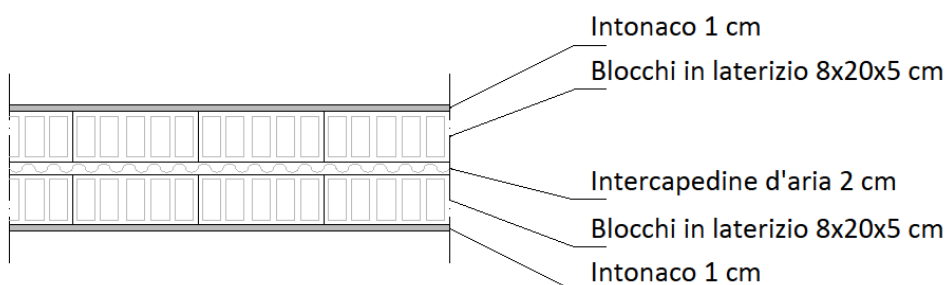
**MURI:** la costruzione è caratterizzata da tre tipologie di parete, differenziate da un codice che ne suddivide le caratteristiche.

- M1: rappresenta il muro perimetrale esterno, possiede uno spessore totale di 35 cm, ed è caratterizzato dagli strati evidenziati in figura. La trasmittanza dell'intero elemento è pari a  $1,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



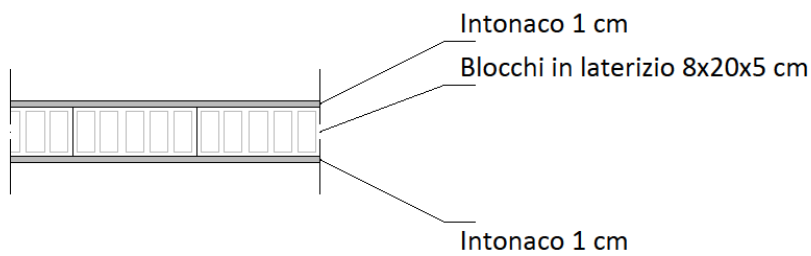
**Figura 3.4 Stratigrafia muro M1**

- M2: la seconda tipologia di parete rappresenta un muro interno che suddivide le unità abitative da vani non riscaldati, come il vano scale, lo spessore di questa tipologia muraria è di 20 cm, con un valore di trasmittanza termica pari a 2,709 W/m<sup>2</sup>K. La stratigrafia è rappresentata in figura.



**Figura 3.5 Stratigrafia muro M2**

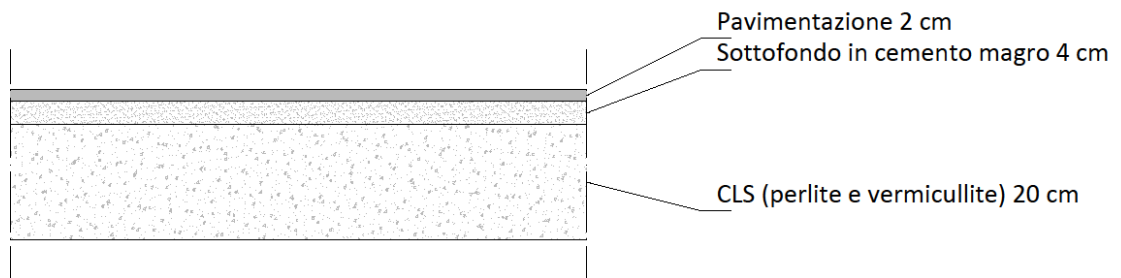
- M3: l'ultima tipologia è rappresentata sempre da un muro interno, ed è posizionato tra i vani riscaldati, come ad esempio tra due unità abitative, con uno spessore di 10 cm. Le informazioni riguardanti la trasmittanza non sono state fornite, i valori sono stati così ipotizzati in funzioni al tipo di materiali utilizzati nella stratigrafia, ottenendo un valore di 3,558 W/m<sup>2</sup>K.



**Figura 3.6 Stratigrafia muro M3**

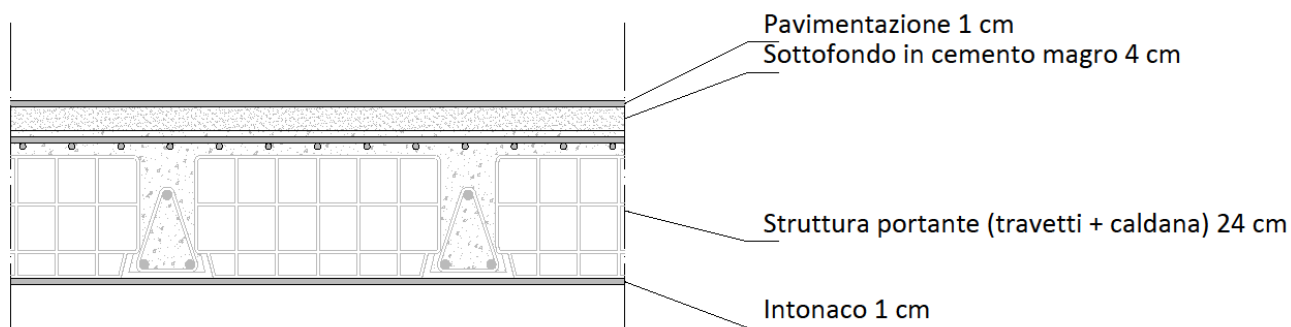
**SOLAI:** nell'edificio oggetto di studio si possono individuare due differenti tipi di questa componente edilizia, in particolare una relativa all'interfaccia con il terreno, e un'altra che è valida sia per l'interno della costruzione sia per l'esterno, quello che cambia però in questa tipologia è il valore di trasmittanza termica. In particolare le tipologie evidenziate sono:

- Solaio contro terra: questo solaio è posizionato nel piano interrato e differisce dalle altre tipologie per spessore, essendo 26 cm, e per stratigrafia, il valore di trasmittanza termica è pari a  $0,549 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



**Figura 3.7 Stratigrafia solaio controterra**

- Solaio interpiano (valido anche per la componente terrazzo): questo elemento ha uno spessore di 35 cm ed una trasmittanza termica di 1,418 W/m<sup>2</sup>K. La stratigrafia è rappresentata in figura.
- Tetto piano: stratigrafia e spessore sono uguali a quelli precedenti, si differisce solo per i valori di trasmittanza termica che sono pari a 1,349 W/m<sup>2</sup>K.



**Figura 3.8** Stratigrafia solaio interpiano, terrazzo, tetto piano

**COMPONENTI FINESTRATI:** I dati contenuti sugli elementi finestrati sono riassunti nella seguente tabella:

**Tabella 3.1** Componenti finestrati

COD	Tipo	Descrizione	Vetro	Altezza H [cm]	Lunghezza L [cm]	Trasmittanza termica U [W/m <sup>2</sup> K]
W1	T	120 x 150	Singolo	150,0	120,0	5,700
W2	T	130 x 150	Singolo	150,0	130,0	5,700
W3	T	140 x 150	Singolo	150,0	140,0	5,700
W4	T	90 x 150	Singolo	150,0	90,0	5,700
W5	T	240 x 150	Singolo	150,0	240,0	5,700
W6	T	65 x 250	Singolo	250,0	65,0	5,700
W7	T	76 x 250	Singolo	250,0	76,0	5,700
W8	T	57 x 150	Singolo	150,0	57,0	5,700
W9	T	76 x 150	Singolo	150,0	76,0	5,700

**CASSONETTO:** Ogni elemento trasparente possiede al di sopra di esso un cassonetto, componente che permette di raccogliere il sistema di oscuramento ed è ospitato all'interno della parete. Il cassonetto ha una notevole differenza di trasmittanza termica rispetto alla componente opaca, avendo un valore di trasmittanza termica pari a  $6,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

**IMPIANTO:** l'impianto di riscaldamento utilizzato nell'edificio è composto da un generatore unico per tutti i condonomi, CARBONFUEL CFE 406 alimentato a metano, munito di un sistema di distribuzione con radiatori come terminali, che caratterizzano il sistema di riscaldamento. L'impianto è quindi di tipo centralizzato. La potenza nominale al focolare, ovvero alla generazione, è pari a  $111,90 \text{ kW}$ ; mentre il potere calorifero del combustibile è di  $9,940 \text{ kWh/Nm}^3$ . Nella sua totalità l'impianto ha un coefficiente di rendimento globale medio (C.O.P) del  $62,8\%$ .

### **3.3. METODI E PROCEDURE DI CALCOLO**

Le fasi operative descritte nel precedente capitolo sono la base per le operazioni da effettuare in questa fase. In particolare andremo a descrivere dettagliatamente le procedure di modellazione dell'edificio, focalizzandoci sull'interno 2, sottoposto al processo di calibrazione. Lo scopo finale è di ottenere i valori dei consumi per il riscaldamento invernale confrontabili con quelli reali, andando ad analizzare i metodi utilizzati dal motore EnergyPlus e dal software per la calibrazione JEPlus+EA.

#### **3.3.1. Modellazione dell'edificio**

Per la creazione del modello si è utilizzato il software Desing Builder, che come detto in precedenza ci permette oltre alla creazione di un modello geometrico, quello di effettuare simulazioni energetiche in regime dinamico grazie all'utilizzo del motore fornito da esso, ovvero EnergyPlus.

Il template del software è suddiviso in più schede: Costruzione, Aperture, HVAC, e Attività, che saranno quelle utilizzate per la modellazione, permettendoci così di procedere per step.

Per prima cosa però si individuerà la località dell'edificio, in tal modo il software andrà ad utilizzare il file climatico della località selezionata. Dopodiché si passa al template del modello, in particolare nel menù "Costruzione" dove verrà creato il modello geometrico dell'edificio, e saranno inserite poi tutte le stratigrafie degli elementi della costruzione e le relative proprietà fisiche di ogni componente. Più precisamente si inizia importando nel file DB le piante forniteci in formato CAD, sulle quali verranno estruse le pareti sia perimetrali che quelle interne e in seguito saranno modellati i balconi.

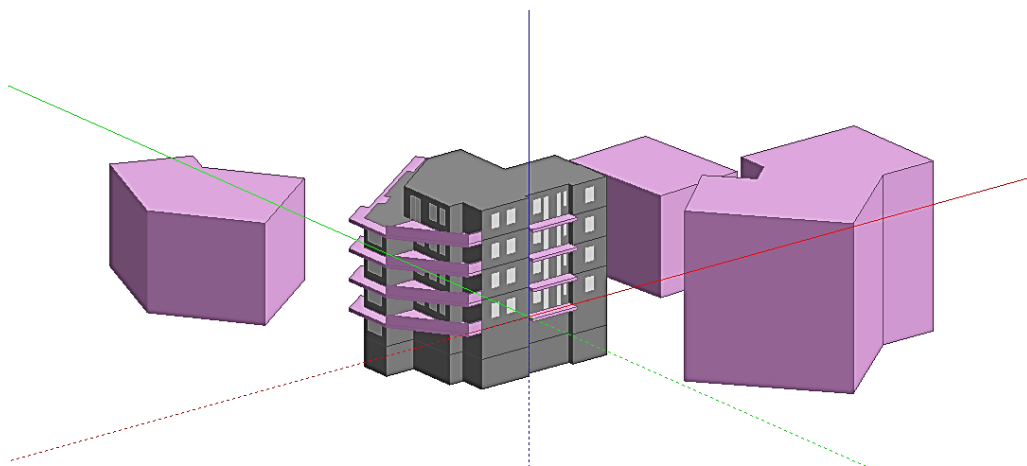
Una volta eseguito il tutto, sul menù dobbiamo andare a selezionare le stratigrafie delle seguenti categorie:

- Pareti (esterna, controterra, partizioni interne)
- Pavimenti (su terra, esterni, interni)
- Tetto (piano, inclinato occupato, inclinato non occupato)
- Sottosuperfici

Per ogni categoria andremo a specificare le componenti della stratigrafia e inseriremo i valori delle proprietà geometriche e fisiche, quali: spessore, conducibilità, calore specifico e densità.

Una volta creata la geometria si passa alla scheda “Aperture” dove si ha la possibilità di inserire porte e finestre; nel nostro modello saranno inserite solo quest’ultime, essendo l’elemento più impattante nell’analisi energetica, e non disponendo informazioni sulle prime. Le componenti finestrate saranno inserite per ogni piano andando a specificarne la geometria. Una volta inserite tutte le componenti si andrà a settare i valori di trasmittanza termica e fattore solare.

Ultimo valore da inserire nella scheda delle “Aperture” è relativo al tasso di infiltrazione, andando a considerare un valore di volume orario pari al 30% come imposto dalla normativa vigente, UNI-TS 11 300.



**Figura 3.9** Modello dell'edificio

Una volta fatto ciò si passa alla modellazione dell'impianto che sarà eseguita nel template del menù "HVAC", dove oltre alle informazioni riguardanti l'impianto di riscaldamento, si possono andare ad inserire input riguardanti la ventilazione, sia meccanica che naturale, il servizio di ACS (acqua calda sanitaria) e dell'impianto di raffreddamento. Per la configurazione dell'impianto di riscaldamento si è scelto di utilizzare il sistema semplificato, dove sarà specificato solo il coefficiente di rendimento globale medio (C.O.P.), il tipo di combustibile e il programma di riscaldamento. Nella relazione tecnica sono riportati i dati da inserire sul software, il valore del C.O.P è pari al 62.7%, mentre il tipo di combustibile utilizzato dall'impianto è il metano. Il template di funzionamento è stato creato prendendo come riferimento quello imposto dalla normativa (UNI-TS 11 300), che prevede l'accensione dell'impianto per un massimo di 12 ore, valido per tutti i giorni della settimana.

Eseguita la configurazione dell'impianto si passa all'ultima scheda del template, ovvero "Attività", dove saranno da specificare le zone termiche da includere nei calcoli, il set-point della temperatura per il riscaldamento e infine saranno inseriti gli apporti interni, che rientrano nel bilancio termico, e coinvolgono sia gli elettrodomestici sia gli occupanti dell'appartamento.

Le zone termiche che saranno escluse dal calcolo dei consumi per il riscaldamento sono quelle in cui non è previsto il sistema di riscaldamento, come garages, il vano della centrale termica e tutti i vani scala. Per quanto riguarda l'impostazione della temperatura di set-point si è imposta una temperatura di 20 °C. Infine saranno configurati gli apporti interni, che varieranno per ogni interno essendo funzione della superficie di ognuno di esso e del numero di occupanti; per il calcolo si è preso come riferimento la normativa UNI-TS 11 300, che prevede: *"Per le abitazioni di categoria E.1 (1) e E.1 (2), aventi superficie utile di pavimento,  $A_f$ , minore o uguale a 120 m<sup>2</sup>, il valore globale degli apporti interni sensibili, espresso in  $W$ , è ricavato come:*

$$\phi_{int} = 7,987 A_f - 0,0353 \times A_f^2$$

*Per superficie utile di pavimento maggiore di 120 m<sup>2</sup> il valore di  $\phi_{int}$  è pari a 450 W".*



Una volta trovati gli apporti interni validi per l'intera superficie, saranno suddivisi per l'area di ogni interno in modo tale da ottenere un valore con unità di misura di  $W/m^2$ .

I valori ottenuti da tale formula sono riportati nella seguente tabella (tab. 3.2).

**Tabella 3.2 Tabella apporti interni per interno**

PIANO	INTERNO	SUPERFICIE [mq]	APPORTO INTERNO [W]	W/mq
0	GATTI	128.37	450.00	3.51
1	LANCELOTTI	81.06	415.48	5.13
	BALDINI	99.63	445.35	4.47
	BALEANI	85.34	424.52	4.97
2	GIOVAGNOLI	62.59	361.62	5.78
	CASARETTA	118.11	450.91	3.82
	FEDELI	85.34	424.52	4.97
3	PRIORI_1	81.06	415.48	5.13
	PRIORI_2	85.34	424.52	4.97
	ANGELONI	99.63	445.35	4.47
4	MASSARI	110.76	451.59	4.08
	RONCITELLI	70.23	386.82	5.51

### 3.3.2. Modellazione interno 2

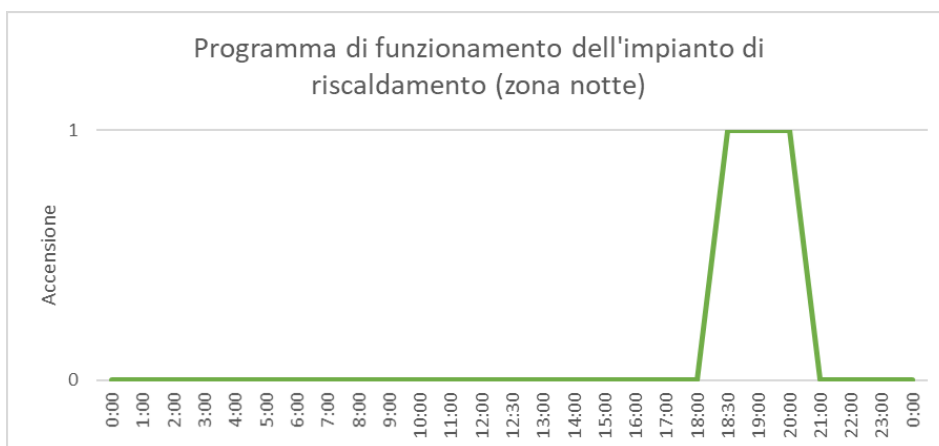
Una volta ottenuto un modello accurato dell'edificio, si passa alla modellazione più dettagliata di un unico interno, in questo caso dell'interno 2, del quale possediamo maggiori informazioni riguardanti occupazione, utilizzo dell'impianto ed i consumi mensili per il riscaldamento. In particolare, partendo dal modello creato precedentemente, si andranno ad escludere dai calcoli termici tutte le zone termiche, includendo esclusivamente l'interno 2 e il vano scale adiacente ad esso.

Sarà poi creata una suddivisione dell'abitazione, che ci permetta di suddividere l'appartamento in zona giorno e zona notte in modo tale da poter creare due programmi di accensione del sistema di riscaldamento. In particolare avremmo il

funzionamento dell'impianto dalle 18.00 alle 20.00 per la zona notte, mentre per la zona giorno l'accensione sarà prevista dalle 12.00 alle 14.00 e dalle 18.00 alle 20.00, valido per tutti i giorni, escluso il periodo che intercorre tra il 25 Aprile e il 31 ottobre, in cui non è prevista l'accensione dell'impianto.



**Grafico 3.1 Programma di accensione della zona giorno**



**Grafico 3.2 Programma di accensione della zona notte**

Inoltre sono stati aggiunti dati di input relative alla ventilazione naturale, che prevederà un valore di ricambio d'aria pari a 15, espresso come volume orario, per un intervallo di tempo di un'ora dalle 7.00 alle 8.00. Il valore del tasso di infiltrazione dovrà essere modificato, ed inserito un valore di 0,4 vol/h. L'ultima modifica riguarderà l'apporto interno, che sarà preso costante pari a 5 W/m<sup>2</sup>.

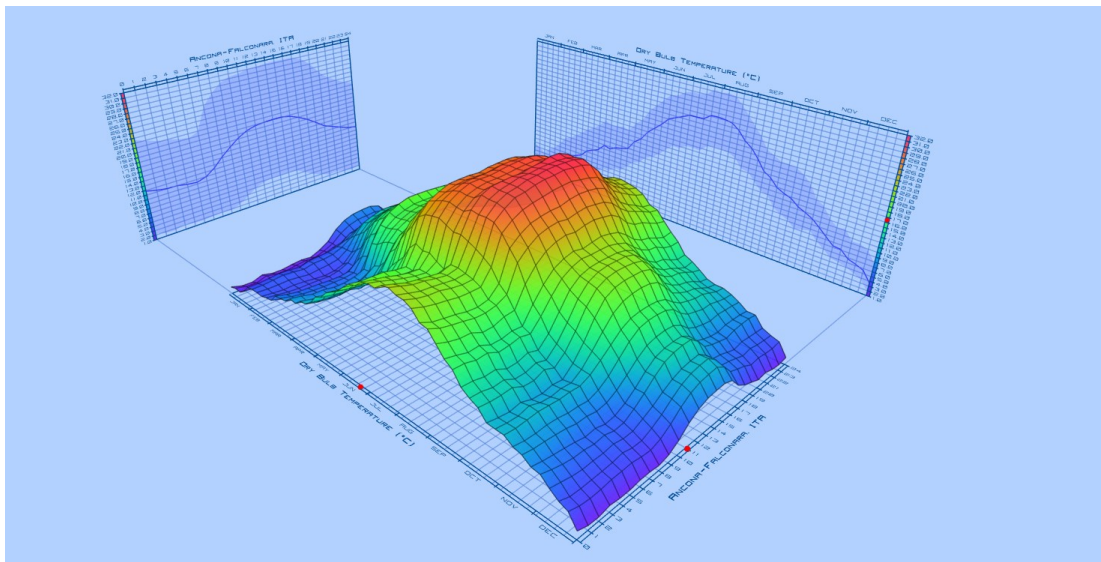
### 3.3.3. Definizione delle condizioni climatiche

Per realizzare delle simulazioni in regime dinamico, che ci permettano una rappresentazione più attendibile della realtà, è importante basarsi su dati climatici dettagliati, in particolare sono stati raccolti numerosi dati relativi all'anno 2017 nella zona di Ancona, raccogliendo informazioni relative a:

- Temperatura a bulbo secco;
- Temperature a bulbo umido;
- Pressione;
- Umidità relative;
- Irraggiamento (normale, orizzontale, diretto, diffuso);
- Velocità del vento;

Una volta ottenuti tutti questi dati si ha la possibilità di creare un file climatico (EPW) sul quale EnergyPlus basa le proprie simulazioni.

La web app sviluppata da Andrew March [8] “Weather Data” ci permette di graficizzare file climatici EPW rappresentando l'andamento dei dati prima indicati in funzione del tempo.



**Grafico 3.3** Andamento Temperatura a bulbo secco Ancona 2017

Il grafico ci permette di comprendere la mole di dati contenuta in questo file, e capirne le variabili che entrano in gioco durante un'analisi in regime dinamico.

Il file climatico EPW sarà utilizzato in seconda fase, andando a sfruttare EnergyPlus, poichè il software DesingBuilder sfrutta un file EPW standard, relativo alla località inserita in prima fase di modellazione. Il file climatico creato sarà quindi utilizzato solo una volta eseguita l'esportazione in formato IDF della simulazione di DesingBuilder, in modo tale da eseguire la simulazione energetica direttamente dall'applicazione di EnergyPlus.

### 3.3.4. Conteggio dei consumi

Creato il file climatico, passiamo al conteggio dei consumi. Partendo dalle bollette forniteci dai condomini, sono calcolati i dati relativi ai consumi dell'intero edificio. Più precisamente si è partito dai valori di Smc (standard metro cubo); unità di misura che viene utilizzata nelle bollette, che rappresenta il quantitativo di metri cubi di gas, sulla quale sono calcolati poi i costi. Da questi dati si effettua la conversione, portando i valori in Watt ora, unità di misura utilizzata dal sistema internazionale. In particolare visto l'ordine di grandezza dei consumi si utilizzeranno i kiloWatt ora (kWh). Per la conversione si utilizza una semplice formula:

$$\text{Consumi (kWh)} = \text{Consumi (Smc)} \times 9,5 \text{ kWh/m}^3$$

Tabella 3.3 Consumi globali dell'edificio caso studio, periodo 2016/2017

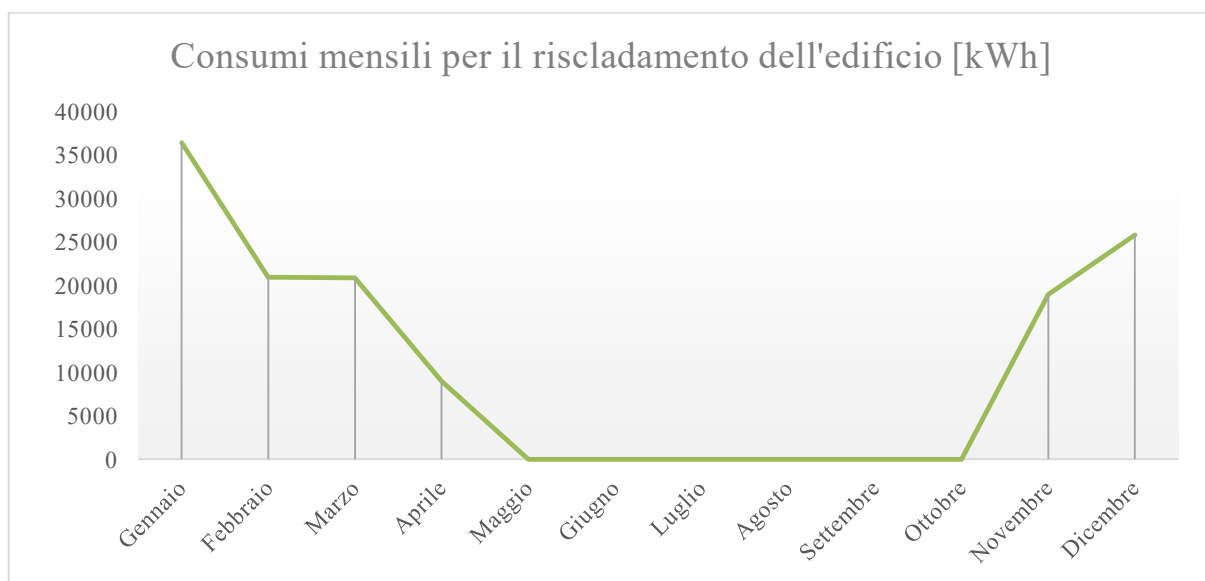
Anno	Mese	Consumo [Smc]	Consumo [kWh]	UR
2016	Ottobre/Novembre	2344.42	22271.99	
2016	Dicembre	2738.6	26016.7	
2017	Gennaio	3835.7	<b>36439.15</b>	
2017	Febbraio	2204.5	<b>20942.75</b>	
2017	Marzo	2197.25	<b>20873.875</b>	
2017	Aprile	946.8	<b>8994.6</b>	
<b>TOTALE GAS</b>		<b>14267.27</b>	<b>135539.065</b>	48344

**Tabella 3.4 Consumi globali dell'edificio caso studio, periodo 2017/2018**

Anno	Mese	Consumo [Smc]	Consumo [kWh]	UR
2017	Novembre	1995.5	<b>18957.25</b>	
2017	Dicembre	2718	<b>25821</b>	
2018	Gennaio	3574.3	33955.85	
2018	Febbraio	2440.13	23181.235	
2018	Marzo	1950.37	18528.515	
2018	Aprile	864.5	8212.75	
<b>TOTALE GAS</b>		<b>13542.8</b>	<b>128656.6</b>	<b>46301</b>

I dati evidenziati in verde sono quelli da considerare per l'analisi, poiché disponiamo di un file climatico relativo all'anno 2017.

Andando a riportare in grafico esclusivamente i valori relativi all'anno 2017 otteniamo:



**Grafico 3.4 Consumi globali per il riscaldamento dell'edificio caso studio**

I valori saranno poi utilizzati per andare a constatare l'affidabilità del modello creato, verificando che l'ordine di grandezza dei consumi mensili reali siano gli stessi di quelli ottenuti in Desing Builder ed Edil Clima.

Una volta ottenuti i valori globali si passa a quelli dell'interno 2, che verranno utilizzati per la calibrazione del modello.

Per ottenere i valori desiderati si parte da quelli posseduti nelle bollette dell'interno 2, in particolare dai valori di fatturazione UR (unità di ripartizione), che rappresenta un numero adimensionale che sta ad indicare l'energia emessa, quindi il consumo volontario dell'utente. Per il D.Lgs. 102/14 il valore di UR è ricavato con la seguente formula:

$$UR = C_g \times K_q \times K_c \times K_t$$

Dove:

$C_g$  è il conteggio grezzo senza tener conto degli altri tre fattori;

$K_q$  tiene conto della potenza nominale del radiatore;

$K_c$  corregge la differenza di temperatura sentita dal ripartitore e la riporta al valore esatto;

$K_t$  si usa in caso di temperatura ambiente molto diversa da 20°C.

La formula per la conversione dei consumi da UR a kWh è la seguente:

$$\text{Consumi (kWh)} = \text{Consumi volontari per il riscaldamento} \times UR_{\text{int, mese}} / UR_{\text{tot}}$$

Dove:

Consumi volontari per il riscaldamento rappresenta un valore ricavato per ogni periodo di fatturazione. Nel nostro caso avremmo due valori, uno per il periodo 2016/2017, e uno per 2017/2018;

$UR_{\text{int, mese}}$  rappresente il valore di UR di un relativo interno e varia ogni mese;

$UR_{\text{tot}}$  valore di UR globale dell'intero edificio, anche questo è riferito al singolo periodo di fatturazione.

Tabella 3.5 Consumi dell'interno 2 reali, periodo 2016/2017

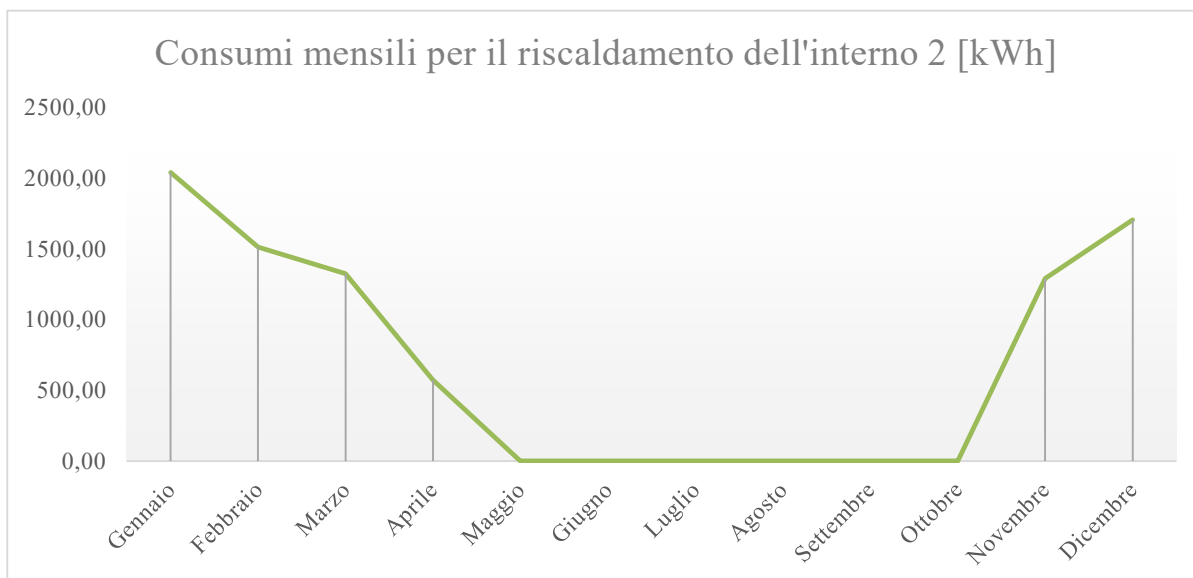
Anno	Mese	UR	kWh
2016	Novembre	763	1290.89
2016	Dicembre	953	1564.74
2017	Gennaio	1241.00	<b>2037.61</b>
2017	Febbraio	920.00	<b>1510.56</b>
2017	Marzo	806.00	<b>1323.38</b>
2017	Aprile	348.00	<b>571.39</b>
TOT		5031	8298.57

Tabella 3.6 Consumi dell'interno 2 reali, periodo 2017/2018

Anno	Mese	UR	kWh
2017	Novembre	805.00	<b>1287.54</b>
2017	Dicembre	1064.00	<b>1701.80</b>
2018	Gennaio	921	1473.08
2018	Febbraio	1054	1685.80
2018	Marzo	637	1018.84
2018	Aprile	58	92.77
TOT		4539	7259.82

I valori evidenziati in verde sono quelli da prendere in considerazione per la calibrazione, disponendo il file climatico di Ancona del 2017.

Nel seguente grafico sono rappresentati i consumi mensili per il riscaldamento dell'interno 2, relativi all'anno 2017.



**Grafico 3.5** Consumi mensili per il riscaldamento dell'interno 2

### **3.3.5. Analisi energetica, confronto in regime stazionario e dinamico**

Prima di passare alla fase di simulazione in regime dinamico con EnergyPlus, si farà un confronto tra le due modalità differenti di analisi energetica utilizzate da Edil Clima e Desing Builder, che utilizzano rispettivamente analisi in regime semi stazionario e analisi in regime dinamico.

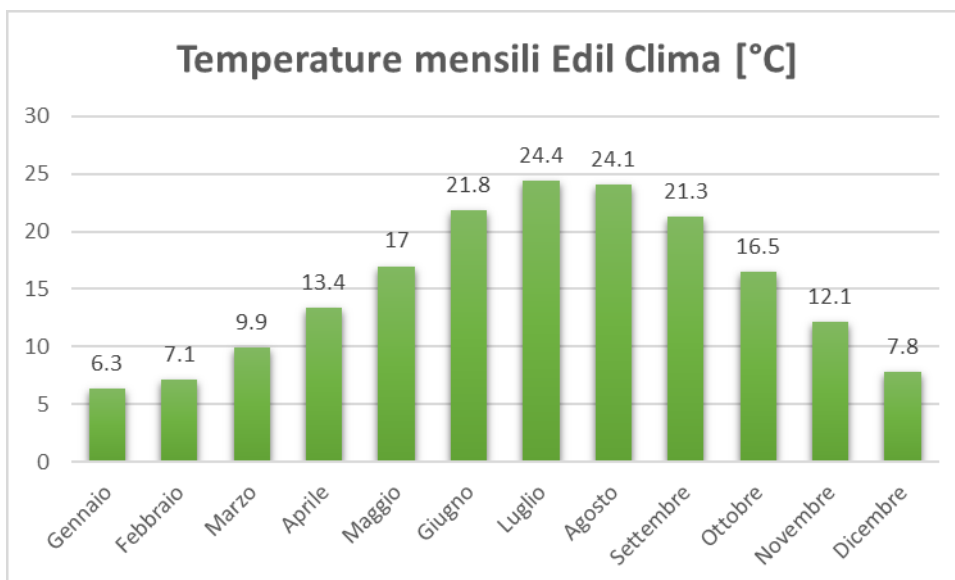
Prima però è importante definire il significato di analisi energetica, come spiegato di seguito da Daniele Di Giorgio sul sito web MyGreenBuildings [9]: *“La simulazione energetica consiste nella realizzazione di un modello numerico capace di descrivere le caratteristiche dell’edificio e degli impianti e nell’esecuzione di calcoli finalizzati all’ottenimento di informazioni energetiche del sistema edificio-impianto quando sottoposto a particolari sollecitazioni”*.

Per realizzare le simulazioni di cui parliamo esistono più approcci. Come detto in precedenza i principali sono l’utilizzo di un regime dinamico e stazionario (o semi



stazionario). La sostanziale differenza dei due processi di analisi riguarda l'intervallo temporale su cui è eseguita l'analisi, ma entrando nel dettaglio possiamo notare le numerose differenze dei due processi.

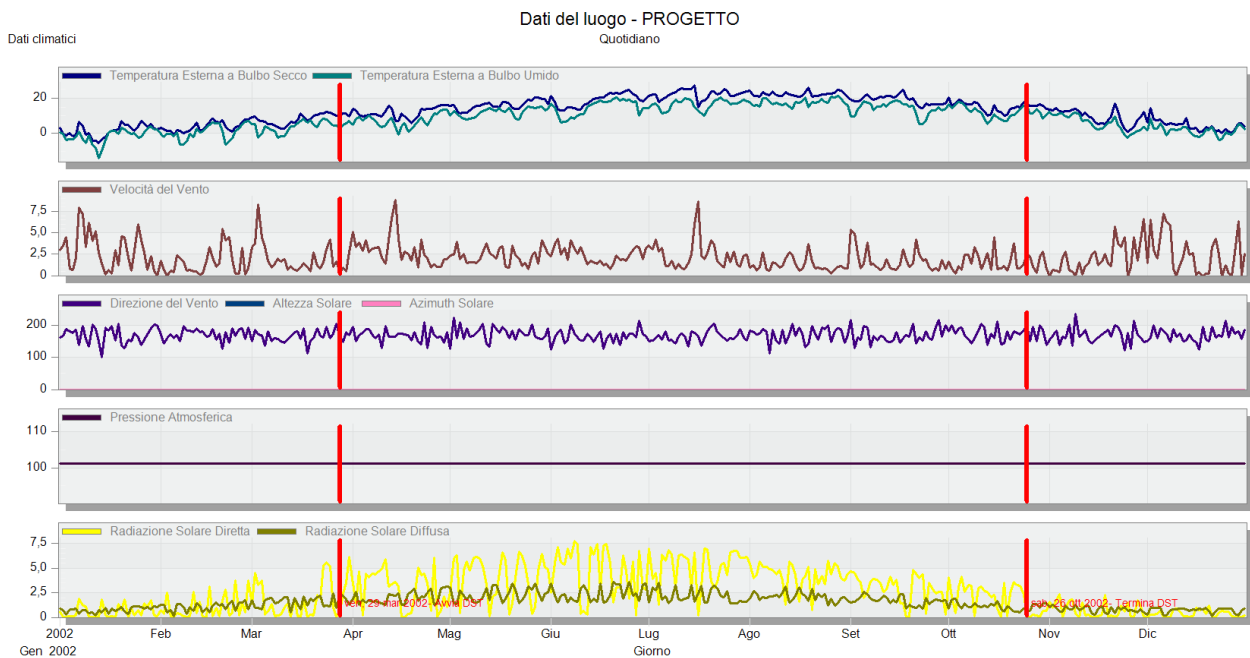
Le simulazioni in regime semi stazionario hanno una maggiore semplicità di esecuzione, e proprio per questo sono anche le più utilizzate. Gli intervalli temporali su cui agiscono sono solitamente mensili o anche stagionali, proprio per questo motivo i modelli che sfruttano questo metodo contengono numerose semplificazioni, come spiegato da Alberto Gallotta nella sua pubblicazione nel sito [ArchitetturaEcoSostenibile.it](http://ArchitetturaEcoSostenibile.it) [10]: *“In regime stazionario o semi-stazionario il bilancio energetico viene fatto unicamente come un confronto tra le temperature interne ed esterne avendo come elemento di separazione una parete con una trasmittanza termica definita e costante nel tempo e senza massa o sfasamento. In genere gli input di questo genere di programmi si limitano a scarse indicazioni geografiche (spesso limitate al comune), ad una sommaria modellazione geometrica e spesso ad una indicazione approssimativa degli impianti presenti e delle schedule di utilizzo dell'edificio stesso”*.



**Grafico 3.6** Temperature mensili Edil Clima

Come possiamo notare dal grafico, Edil Clima che sfrutta analisi energetiche in regime semi stazionario ha intervalli di campionamento mensili, con temperature costanti.

Invece per le simulazioni in regime dinamico le unità di tempo prese in considerazione per le analisi possono scendere anche alla scala oraria, ciò ci permette di eseguire simulazioni anche giornaliere, avendo a disposizione un dettaglio molto più accurato delle variabili esterne. Infatti i modelli che sfruttano questo tipo di analisi saranno molto più dettagliati e conterranno un numero di informazioni molto superiore rispetto ai modelli utilizzati per simulazioni a regime stazionario.



**Grafico 3.7 Dati climatici Desing Builder**

Come possiamo vedere dal grafico, la quantità di dati climatici e variabili che entrano in gioco nella fase di simulazione energetica è molto maggiore rispetto a quelle in regime stazionario o semi stazionario, proprio per questo motivo, non ci aspettiamo che il confronto dei dati di output tra i modelli di Desing Builder e Edil Clima porti a minime differenze, ma abbiamo la necessità che almeno l'ordine di grandezza dei consumi mensili relativi al riscaldamento invernale siano confrontabili.

### **3.3.6. Parametrizzazione del modello dell'interno 2 in JEPlus**

Per la parametrizzazione del modello necessitiamo di un file di simulazione (IDF) esportato da DesingBuilder, il file IDF, prima di passare sul software JEPlus, sarà modificato in EnergyPlus, con l'obiettivo di eliminare gli output che non sono utili alla simulazione, in modo tale che quest'ultima sia più veloce nell'esecuzione.

Ottenuto il file IDF del modello con le modifiche apportate, verrà poi aperto su JEPlus, che permetterà di parametrizzare alcuni dati di input del modello, ed eseguire quindi numerose simulazioni facendo variare i parametri in un range da noi determinato.

Nel dettaglio sono stati parametrizzati i seguenti valori:

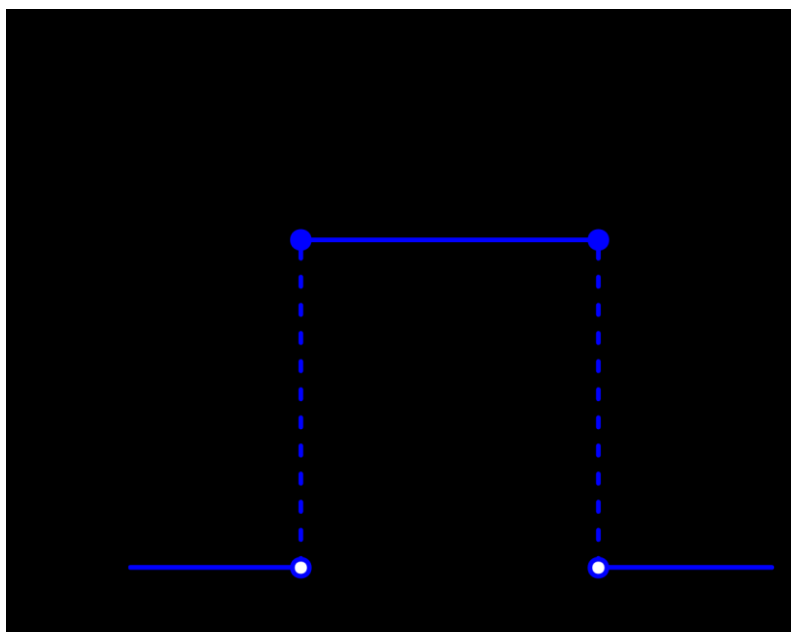
- Conducibilità e densità degli elementi più impattanti per ogni stratigrafia (es. Nella stratigrafia della parete con codice M1, sono stati variati i valori dell'elemento più spesso, ovvero il blocco in laterizio forato di 12 cm);
- Resistenza termica dell'area;
- Trasmittanza termica degli elementi finestrati;
- Apporti interni, differenziando due parametri uno relativo alla zona notte e uno alla zona giorno;
- Ventilazione, differenziando due parametri uno relativo alla zona notte e uno alla zona giorno;
- Tasso di infiltrazione.

I parametri vengono inseriti sostituendo i valori dal file IDF, tramite il seguente codice: "@@tag00@@", andando a specificare un range di valori che ognuno di essi può assumere.

**Tabella 3.7 Range dei valori dei parametri**

Parametro	N° di parametri	Limite inferiore	Limite superiore
Conducibilità materiali pesanti (parete)	2	0.15	2.4
Densità materiali pesanti (parete)	2	400	2500
Conducibilità materiali pesanti (solaio)	2	0.27	1.91
Densità materiali pesanti (solaio)	2	600	2400
Resistenza termica (camera d'aria)	3	0.144	0.216
Apporti interni (zona giorno e zona notte)	2	2.5	6.5
Trasmittanza termica (vetro di progetto)	1	2	6
Ventilazione naturale	2	0	30
Tasso di infiltrazione	3	0	0.8

Determinati gli intervalli su cui far variare i parametri bisognerà scegliere la tipologia distributiva dei valori scelti. Le modalità di distribuzione più utilizzate sono, la distribuzione Gaussiana e la distribuzione uniforme. Quest'ultima sarà quella da noi adoperata, poichè definiti i limiti superiori ed inferiori, abbiamo la stessa probabilità di scelta per tutti i punti appartenenti all'intervallo.



**Grafico 3.8 Distribuzione uniforme**

In figura è rappresentata la distribuzione uniforme, definiti i limiti inferiori e superiori, [a;b].

Una volta scelti i parametri e la loro distribuzione si passa alla scelta dei metodi di campionamento, ovvero la metodologia di scelta di alcuni parametri rispetto ad altri. Il software fornisce le seguenti metodologie:

- Metodo di campionamento casuale SHUFFLE;
- Metodo di campionamento stratificato LHS (Latin Hypercube Sampling);
- Metodo SOBOL;

La scelta da noi adoperata è il metodo LHS, che permette un buon compromesso relativo alla velocità di calcolo e l'accuratezza e la convergenza dei risultati.

### **3.3.7. Ottimizzazione del modello tramite JE+EA**

Il software JE+EA, è utilizzato per ottimizzare il modello creato, basandosi su una funzione obiettivo e su i parametri precedentemente scelti. Il funzionamento del programma avviene con l'esecuzione di numerose simulazioni, che permettono di individuare la soluzione che più si avvicina all'obiettivo preimpostato. Nel dettaglio l'algoritmo NSGA-II (Non dominated sorting genetic algorithm) utilizzato dal software permette di migliorare la sua precisione andando ad individuare la parametrizzazione migliore con l'aumentare del numero di simulazioni.

L'algoritmo esegue l'ottimizzazione su una popolazione da noi definita, dove quest'ultima è basata su individui che a loro volta sono rappresentati da cromosomi contenenti i geni. L'ottimizzazione avviene tramite i tre operatori genetici forniti da JE+EA:

- Crossover: operatore che agisce scambiando un segmento di un cromosoma con il segmento corrispondente su un altro cromosoma in una posizione casuale;

- Mutazione: operatore che agisce andando a scartare casualmente dei geni;
- Selector: operatore che sfrutta la miglior soluzione per passare alle generazioni future;

Tabella 3.8 Valori degli operatori generici inseriti in JE+EA

Operatore genetico	Valore scelto
Crossover	1
Mutazione	0.2
selector	2

Una volta inseriti gli operatori genetici si passa alla scelta della dimensione della popolazione che è il parametro che definisce il numero di simulazioni da effettuare, il valore consigliato da S. Martínez, P. Eguía, E. Granada, A. Moazami, M. Hamdy nella loro pubblicazione [3], è di 4 volte il numero dei parametri precedentemente definiti (19 nel nostro caso). Saranno eseguite più calibrazioni variando i valori di popolazione, in modo tale da verificare le differenze che comporta l'aumento del numero di variabili nel processo di ottimizzazione.

Ogni individuo che compone la popolazione è valutato sostituendo i valori variabili nel file EnergyPlus con i valori forniti dall'algoritmo; perciò per creare le successive generazioni, l'algoritmo calcola la popolazione attuale in base ai valori valutati dalle funzioni obiettivo. Gli individui sono scelti andando a settare nel software il numero di massima generazione.

Per individuare un numero di simulazioni, che ci permetta di garantire una buona ottimizzazione del modello, si fa riferimento allo studio condotto da Hamdy et al. [11] che ha evidenziato come una variante dell'algoritmo NSGA-2 per raggiungere le sue soluzioni ottimali siano state necessarie circa 1000 valutazioni. Inoltre aumentando il numero di valutazioni, e di conseguenza anche i tempi per il loro calcolo, non si ottengono significativi miglioramenti per l'ottimizzazione del modello.

### 3.3.8. Calcolo dell'errore (JE+EA)

Per permettere al software di eseguire l'ottimizzazione è necessario definire una o più funzioni algebriche, in modo tale che l'algoritmo sia in grado di interpretarle e sfruttarle per ottenere risultati migliori rispetto a ciò che chiediamo. Più precisamente sarà sfruttato uno script in Python che ci permette di effettuare un confronto tra dati reali e quelli simulati, in termini di NMBE e CVRMSE.

Per la funzione obiettivo verranno utilizzati i valori dei consumi invernali per il riscaldamento dell'interno 2, relative all'anno 2017. I valori che dovremmo ottenere dall'ottimizzazione dovranno essere confrontabili con quelli reali.

Tabella 3.9 Consumi per il riscaldamento invernali dell'interno 2 (funzione obiettivo)

Anno	Mese	Consumi reali [kWh]	Consumi reali [J]
2017	Gennaio	2037.61	7335406631
	Febbraio	1510.56	5438012974
	Marzo	1323.38	4764172236
	Aprile	571.39	2056987516
	Maggio	0.00	0
	Giugno	0.00	0
	Luglio	0.00	0
	Agosto	0.00	0
	Settembre	0.00	0
	Ottobre	0.00	0
	Novembre	1287.54	4635154497
	Dicembre	1701.80	6126465075
TOT		8432.28	30356198928.30

Per quanto riguarda i due indici di confronto utilizziamo i seguenti:

NMBE (Normalized Mean Bias Error): che è la normalizzazione dell'indice MEB (Mean Bias Error), nonché una media degli errori ottenuti, esplicitata dalla seguente formula:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n}$$

Dove:

$m_i$  corrisponde al valore misurato;

$s_i$  corrisponde al valore simulato;

$n$  corrisponde al numero di misurazioni.

Di conseguenza il valore normalizzato (NMBE) è ottenuto tramite la seguente formula:

$$NMBE = \frac{1}{\bar{m}} \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n - p} \times 100$$

Dove:

$m_i$  corrisponde al valore misurato;

$s_i$  corrisponde al valore simulato;

$n$  corrisponde al numero di misurazioni;

$\bar{m}$  corrisponde alla media dei valori misurati;

$p$  corrisponde al numero dei parametri del modello regolabili.

CVRMSE (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error): corrisponde al valore normalizzato del coefficiente di variazione dello scarto quadratico medio. A differenza dell'indice NMBE che è soggetto ad un errore dovuto alla cancellazione, il CVRMSE non ha questa proprietà, per questo motivo necessitiamo di entrambi i valori per verificare l'accuratezza dei modelli. Un'altra definizione dell'indice è fornita nel libro pubblicato da G. R. Ruiz e C. F. Bandera: *“L'indice CVRMSE fornisce la variabilità degli errori tra valori misurati e simulati”* [12].



La formula che sfrutta L' algoritmo è la seguente:

$$\text{CVRMSE} = \frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n - p}} \times 100$$

Dove:

$m_i$  corrisponde al valore misurato;

$s_i$  corrisponde al valore simulato;

$n$  corrisponde al numero di misurazioni;

$\bar{m}$  corrisponde alla media dei valori misurati;

$p$  corrisponde al numero dei parametri del modello regolabili.

## 4. RISULTATI

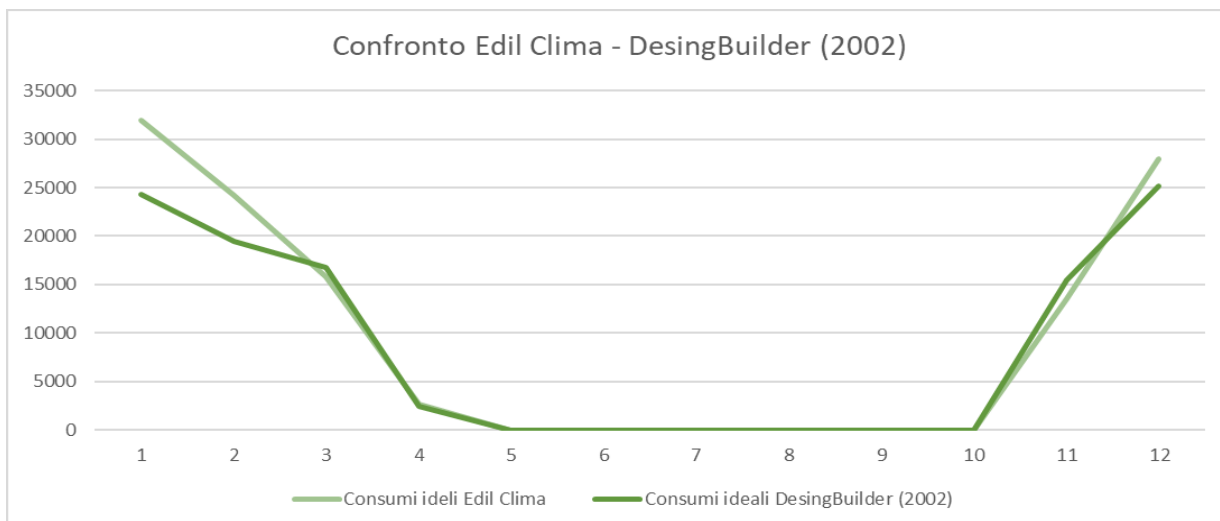
### 4.1. Confronto regime dinamico e regime permanente dei consumi ideali

Nella seguente tabella sono riportati i valori dei consumi ideali ottenuti dalla simulazione in Desing Builder. Mettendo a confronto con i dati ricavati con quelli di Edil Clima, possiamo effettuare un confronto dei due metodi di analisi: a regime dinamico (Desing Builder) e a regime stazionario (Edil Clima).

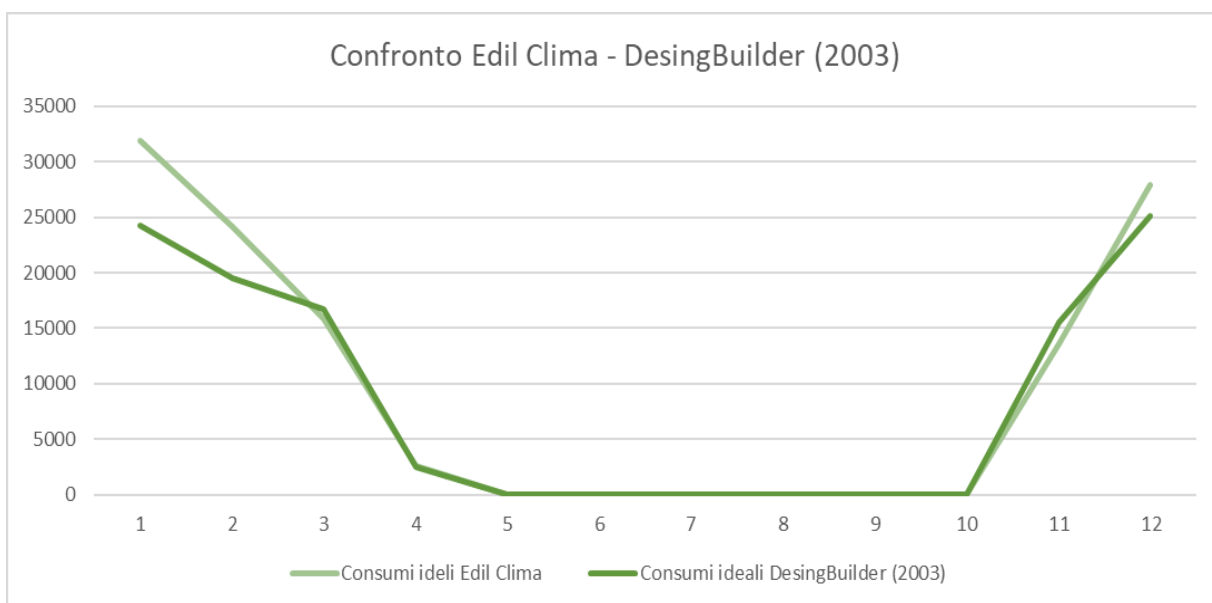
Tabella 4.1 Confronto dei consumi ideali di Edil Clima e Desing Builder (anno 2002 e 2003)

Mese	Consumi ideali Edil Clima [kWh]	Consumi ideali DesingBuilder [kWh]	
		Anno 2002	Anno 2003
Gen	31903	24264.99	24277.16
Feb	24179	19484.49	19488.82
Mar	15819	16717.64	16696.64
Apr	2648	2503.73	2523.55
Mag	0	0	0
Giu	0	0	0
Lug	0	0	0
Ago	0	0	0
Set	0	0	0
Ott	0	0	0
Nov	13554	15492.42	15504.00
Dic	27912	25126.90	25125.67

Dalla tabella sono ricavati i grafici che mettono a confronto l'andamento dei consumi ideali in funzione dei mesi.



**Grafico 4.1** Andamento dei consumi ideali dell'edificio caso studio (Anno 2002)



**Grafico 4.2** Andamento dei consumi ideali dell'edificio caso studio (Anno 2003)

Possiamo notare che le maggiori divergenze tra i due sistemi di analisi siano relative ai primi mesi dell'anno, soprattutto nei mesi più freddi (Gennaio e Febbraio). Possiamo concludere affermando che le differenze ottenute dai dati di output siano legate al differente metodo utilizzato dai due software per realizzare le simulazioni energetiche, e quindi il modello da noi creato è confrontabile con quello di Edil Clima.

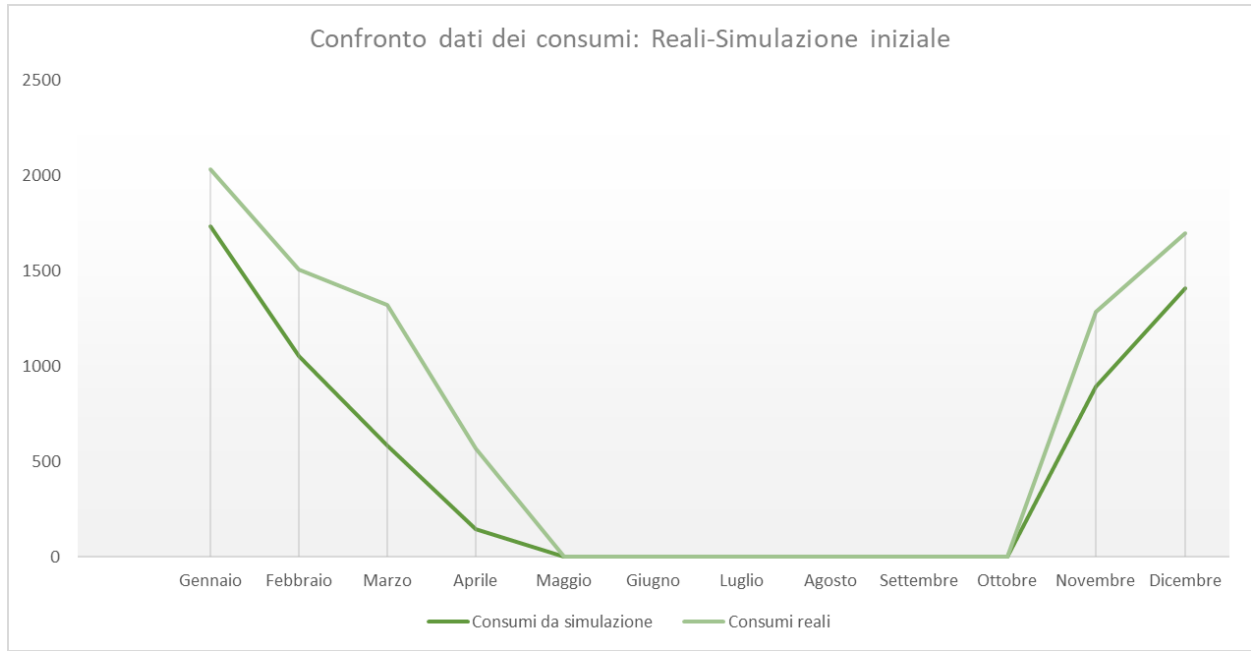
## 4.2. Confronto del modello iniziale (interno 2)

Verificata l'attendibilità del modello dell'intero edificio, si passa ora al controllo del modello dell'interno 2, contenente i dati di input dinamici che prima erano stati semplificati per il confronto diretto con Edil Clima. Sono perciò eseguite le simulazioni in regime dinamico sfruttando il motore Energy Plus. I risultati dei confronti tra i consumi della simulazione iniziale e quelli reali sono riportati nella seguente tabella:

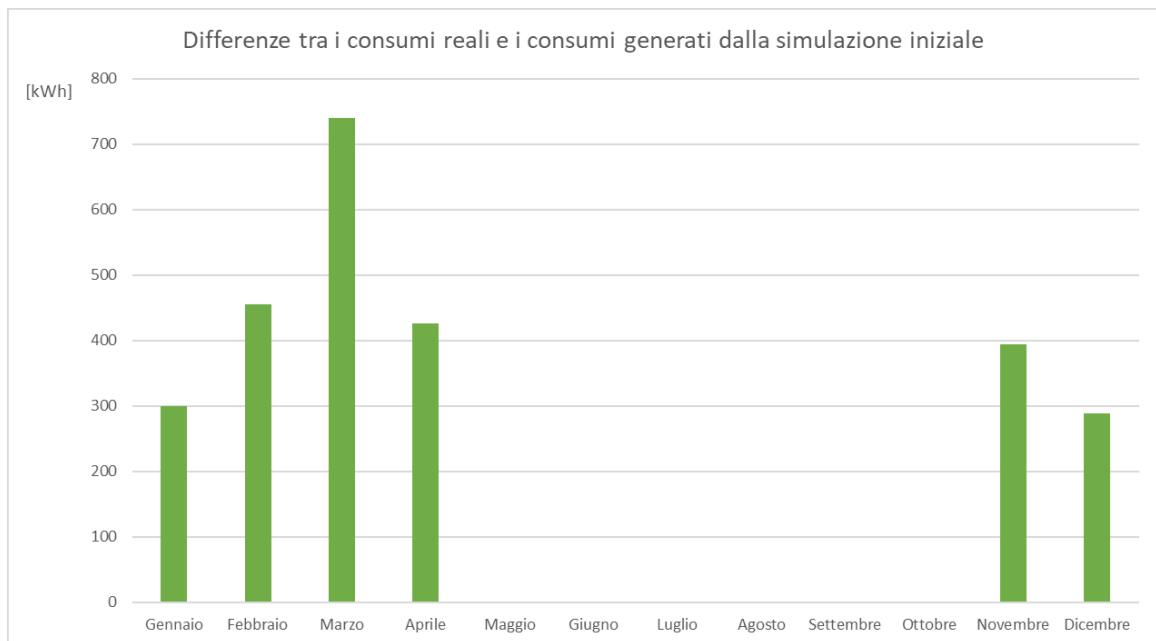
Tabella 4.2 Consumi per il riscaldamento invernale dell'interno 2, simulazione iniziale

Mese	Consumi sim. [kWh]	Consumi reali [kWh]
Gennaio	1737.32	2037.61
Febbraio	1055.76	1510.56
Marzo	582.88	1323.38
Aprile	145.42	571.39
Maggio	0.00	0.00
Giugno	0.00	0.00
Luglio	0.00	0.00
Agosto	0.00	0.00
Settembre	0.00	0.00
Ottobre	0.00	0.00
Novembre	892.97	1287.54
Dicembre	1413.07	1701.80

Come possiamo vedere dalla tabella i valori iniziali si discostano da quelli reali, in particolare nel mese di Marzo.



**Grafico 4.3 Confronto dei dati dei consumi dell'interno**



**Grafico 4.4 Differenze tra i consumi reali e i consumi generati dalla simulazione iniziale**

### 4.3. Individuazione dei settaggi per la calibrazione

Partendo dal modello precedentemente utilizzato si passa alla ricerca dei settaggi da utilizzare per garantire una buona calibrazione, in particolare il processo avviene per variazioni di parametri da noi stabiliti in determinati range. Nella tabella seguente sono riportati i parametri con i loro valori iniziali:

Tabella 4.3 Valori iniziali dei parametri dell'interno 2

	Parametri	Valori iniziali	U.M.
1	Conduttività solaio garage	0.29035	W/mK
2	Densità solaio garage	1200	kg/m <sup>3</sup>
3	Conduttività solaio interpiano	0.3622	W/mK
4	Densità solaio interpiano	1200	kg/m <sup>3</sup>
5	Conduttività laterizio (8 cm)	0.827	W/mK
6	Densità laterizio (8 cm)	1100	kg/m <sup>3</sup>
7	Conduttività laterizio (12 cm)	0.3424	W/mK
8	Densità laterizio (12 cm)	1100	kg/m <sup>3</sup>
9	Resistenza termica	0.18	m <sup>2</sup> K/W
10	Resistenza termica	0.18	m <sup>2</sup> K/W
11	Resistenza termica	0.1667	m <sup>2</sup> K/W
12	Trasmittanza termica dei vetri	5	W/m <sup>2</sup> K
13	Apporti interni zona giorno	5	W/m <sup>2</sup>
14	Apporti interni zona notte	5	W/m <sup>2</sup>
15	Ventilazione zona giorno	15	Vol/hr
16	Ventilazione zona notte	15	Vol/hr
17	Infiltrazione zona scale	0.4	Vol/hr
18	Infiltrazione zona giorno	0.4	Vol/hr
19	Infiltrazione zona notte	0.4	Vol/hr

Per individuare i settaggi da poter inserire per la calibrazione sono state eseguiti numerosi processi di calibrazione, in particolare sono stati fatti variare i valori di Population Size e Generation, i quali definiscono la dimensione della calibrazione.

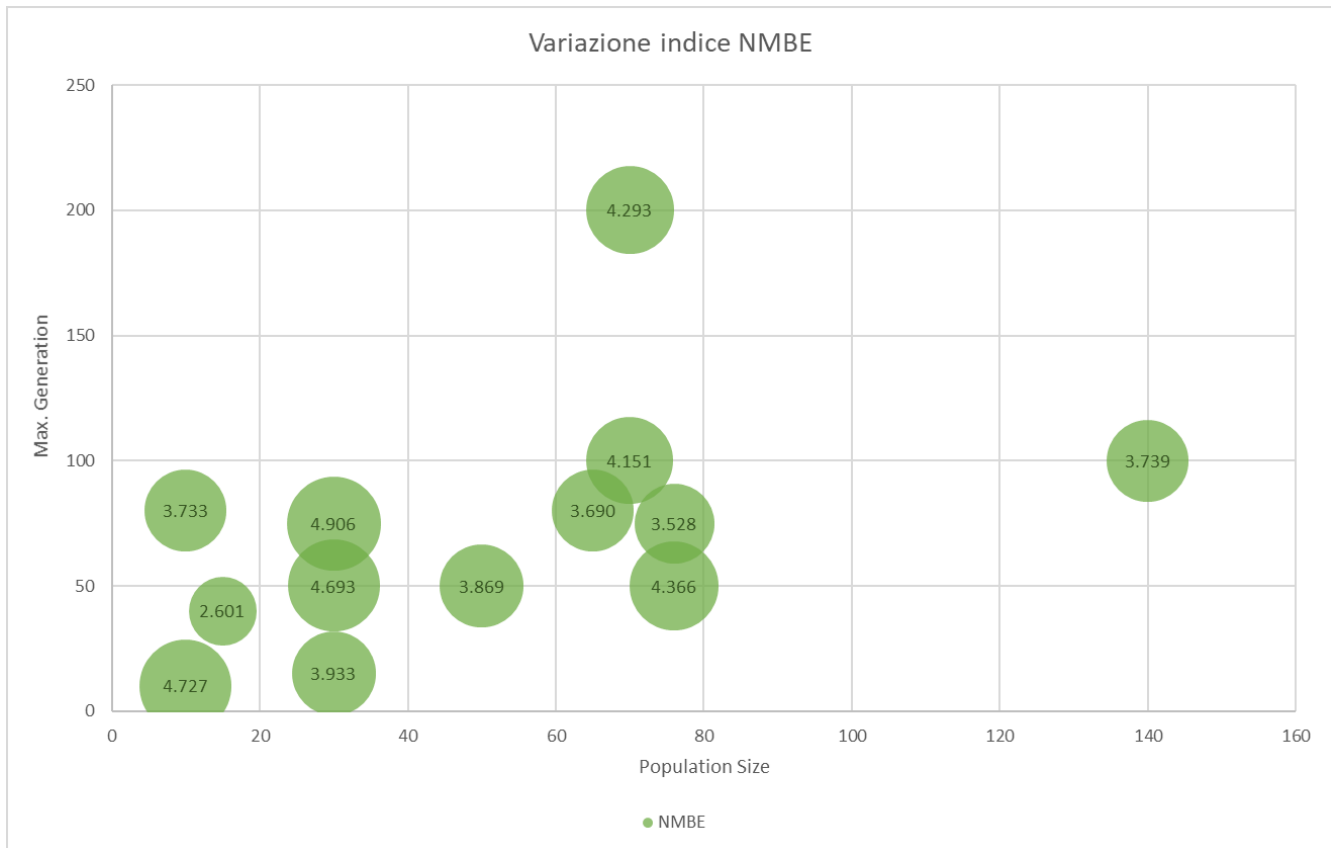
Analizzando le combinazioni di soluzioni di Population Size e Max. Generation, andiamo a studiare le variazioni di precisione degli indici di confronto NMBE e CVRMSE.

Nella seguente tabella sono riportati i risultati migliori di ogni calibrazione. Per ogni processo di ottimizzazione si è individuata la soluzione migliore, ovvero quella che presentava il valore più basso di CVRMSE ed un valore di NMBE inferiore al 5%.

**Tabella 4.4** Variazione dell'indice NMBE

N°	Pop. Size	Max. Gen.	Dimensione tot.	NMBE [%]	CVRMSE [%]
1	10	10	100	4.727	26.104
2	50	50	2500	3.869	23.996
3	30	15	450	3.933	25.220
4	70	100	7000	4.151	23.271
5	76	50	3800	4.366	23.570
6	76	75	5700	3.528	23.289
7	30	50	1500	4.693	23.966
8	30	75	2250	4.906	23.957
9	15	40	600	2.601	23.641
10	10	80	800	3.733	23.480
11	65	80	5200	3.690	23.249
12	140	100	14000	3.739	23.138
13	70	200	14000	4.293	22.511

I valori a cui facciamo riferimento sono quelli evidenziati in verde, che ci rappresentano la variazione del NMBE al variare dei parametri di generazione e popolazione.



**Grafico 4.5 Grafico a bolle, variazione NMBE**

Come si può vedere dal grafico il valore dell'indice NMBE varia per ogni simulazione, ma si mantiene sempre in valori accettabili, ovvero inferiori al 5%, per cui per quanto riguarda l'indice appena studiato possiamo concludere che l'aumento della dimensione del processo di calibrazione non genera miglioramenti significativi.

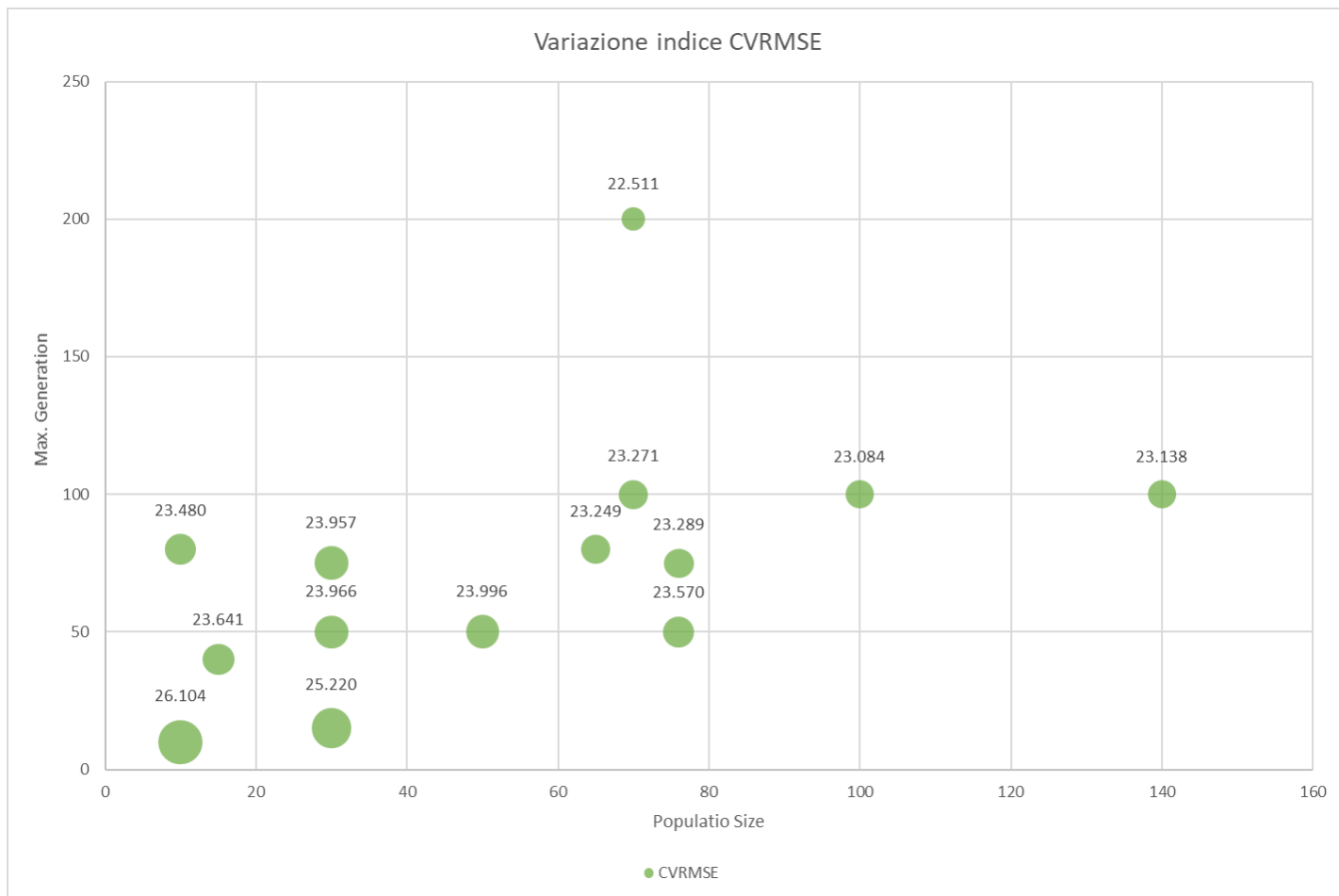
Analogamente andiamo a studiare la variazione dell'indice CVRMSE, andando ad analizzare le variazioni dell'indice con il progressivo aumento della dimensione totale della calibrazione, nella seguente tabella sono riportati i risultati di ogni simulazione con i relativi settaggi:



**Tabella 4.5 Variazione CVRMSE**

<b>Pop. Size</b>	<b>Max. Gen.</b>	<b>Dimensione tot.</b>	<b>CVRMSE [%]</b>	<b>NMBE [%]</b>
10	10	100	26.104	-4.727
50	50	2500	23.996	-3.869
30	15	450	25.220	-3.933
70	100	7000	23.271	-4.151
76	50	3800	23.570	-4.366
76	75	5700	23.289	-3.528
30	50	1500	23.966	-4.693
30	75	2250	23.957	-4.906
15	40	600	23.641	-2.601
10	80	800	23.480	-3.733
65	80	5200	23.249	-3.690
100	100	10000	23.084	-4.361
140	100	14000	23.138	-3.739
70	200	14000	22.511	-4.293

Come fatto per l'indice NMBE si va ad analizzare il grafico a bolle per evidenziare graficamente la variazione dell'indice.

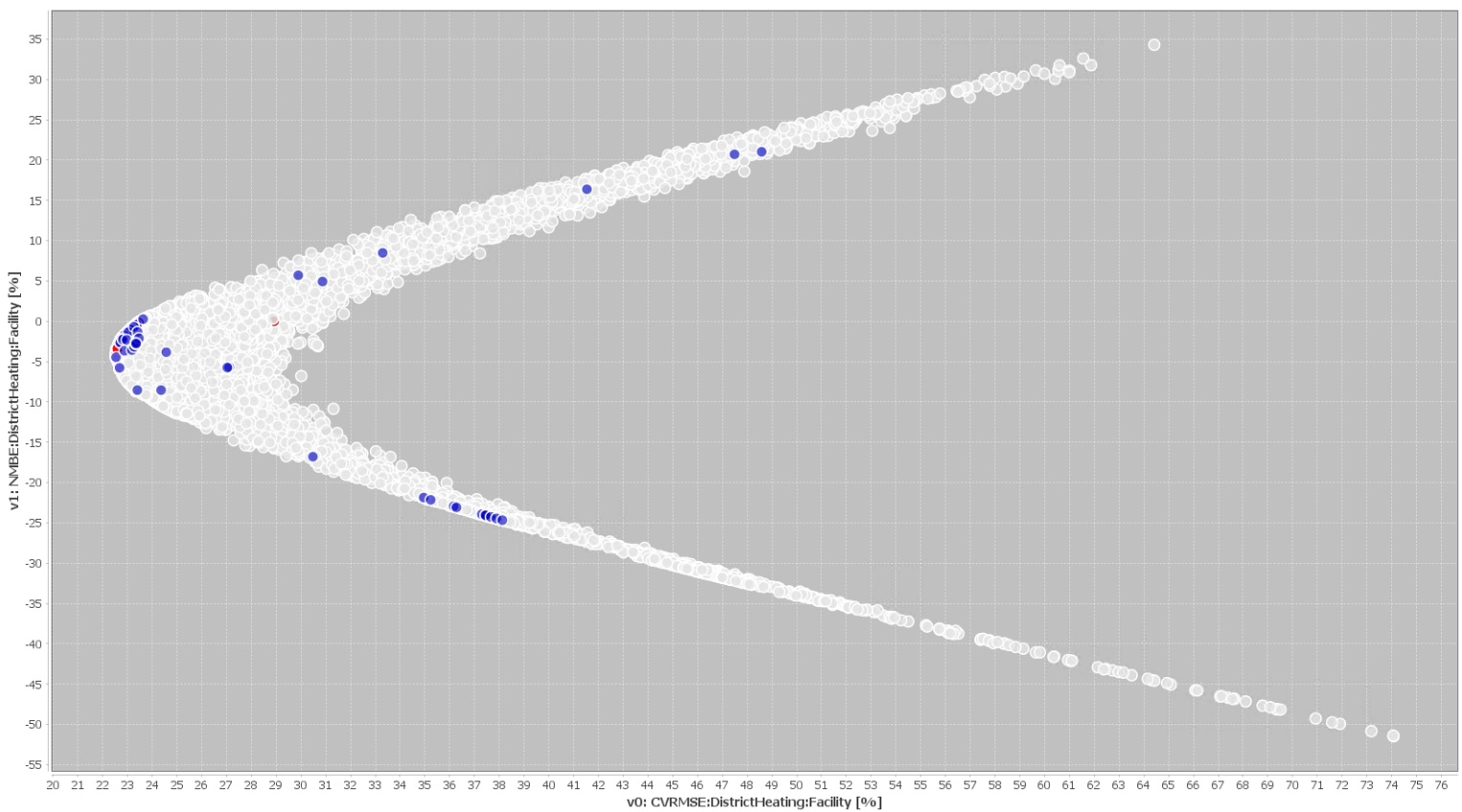


**Grafico 4.6** Grafico a bolle, variazione CVRMSE

Dal grafico soprastante notiamo come la variazione dell'indice non sia elevata anche con l'aumento della dimensione, però possiamo evidenziare che con un aumento del numero di generazioni, si ha un miglioramento della precisione dell'indice CVRMSE. Possiamo quindi concludere che per aumentare la precisione nei processi di calibrazione sia più importante aumentare il numero di generazioni rispetto alla dimensione della popolazione.

#### 4.4. Confronto del modello calibrato.

Individuata la combinazione di parametri migliore, ovvero quella che ci permetta di ottenere un valore di CVRMSE più prossimo all'origine, si studieranno gli output ottenuti dal processo di calibrazione con i settaggi individuati. Nel dettaglio si è scelto di impostare per l'ottimizzazione un valore di Max Generation di 200 e di Population size di 70. Nel seguente grafico sono riportate tutte le soluzioni generate dal processo.



**Grafico 4.7** Curva di pareto

Di tutte le simulazioni generate dalla calibrazione andremo ad analizzare esclusivamente le migliori, ovvero quelle che nel grafico soprastante sono più vicino all'origine, e che quindi abbiano valori di CVRMSE e NMBE più prossimi allo zero.

**Tabella 4.6 Simulazioni analizzate**

Simulazioni	CVRMSE	NMBE
Simulazione 1	22.511	-4.293
Simulazione 2	22.533	-4.152
Simulazione 3	22.533	-4.152
Simulazione 4	22.534	-3.973
Simulazione 5	22.541	-3.417

Delle seguenti 5 calibrazioni andiamo ad analizzare i parametri utilizzati per le simulazioni e gli output prodotti, nonché i consumi invernali per il riscaldamento, graficizzando le soluzioni migliori.

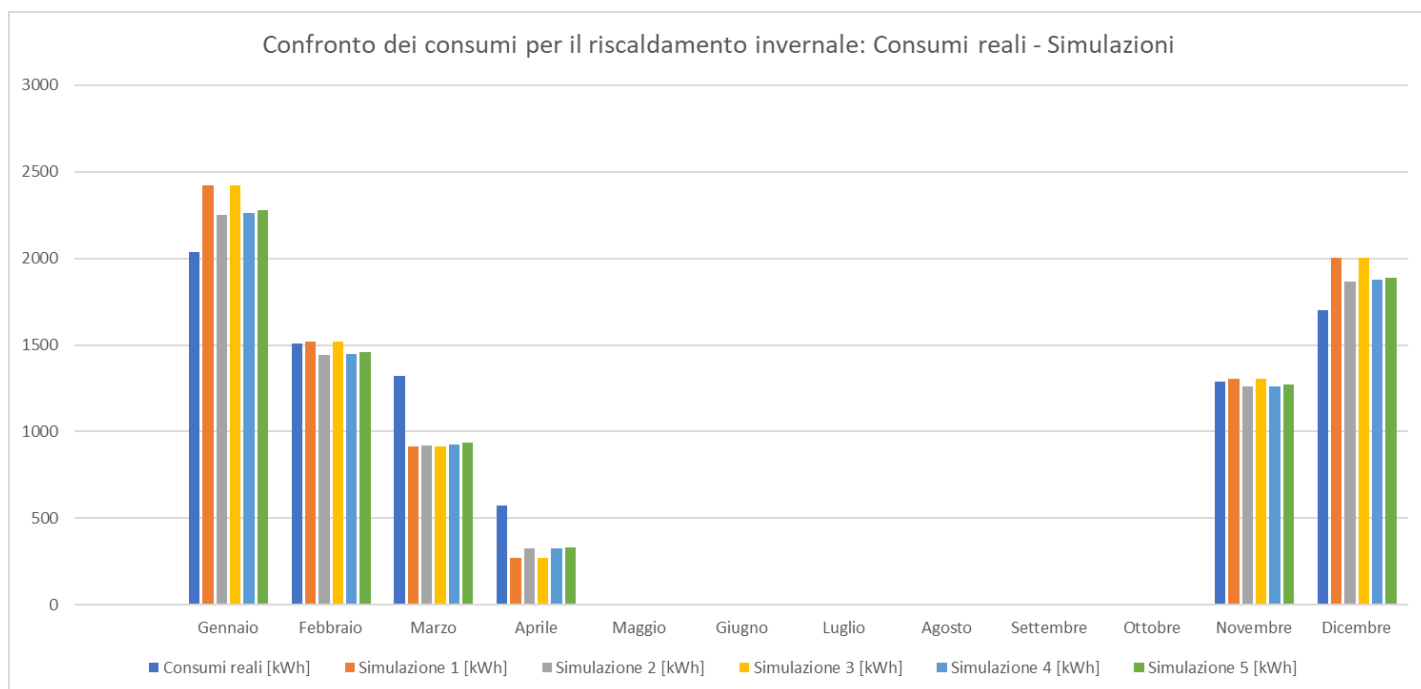
**Tabella 4.7 Valori finali di ogni parametro delle simulazioni studiate**

Parametri		U.M.	Valori calibrati				
			Sim. 1	Sim. 2	Sim. 3	Sim. 4	Sim. 5
1	Conduttività solaio garage	W/mK	0.3867	0.3867	0.3867	0.3867	0.3867
2	Densità solaio garage	kg/m <sup>3</sup>	2348	2348	2348	2348	2348
3	Conduttività solaio interpiano	W/mK	0.2786	0.2786	0.2786	0.2786	0.2786
4	Densità solaio interpiano	kg/m <sup>3</sup>	2255	2255	2255	2255	2255
5	Conduttività laterizio (8 cm)	W/mK	0.5196	0.5196	0.5196	0.5196	0.5196
6	Densità laterizio (8 cm)	kg/m <sup>3</sup>	2381	2381	2381	2381	2381
7	Conduttività laterizio (12 cm)	W/mK	0.4232	0.4232	0.4232	0.4232	0.4232
8	Densità laterizio (12 cm)	kg/m <sup>3</sup>	1645	1645	1645	1645	1645
9	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0.1808	0.1808	0.1493	0.1493	0.1493
10	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0.1927	0.1927	0.1927	0.1927	0.1927
11	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W	0.2028	0.2028	0.2032	0.2032	0.2032
12	Trasmittanza termica dei vetri	W/m <sup>2</sup> K	4.9568	4.9568	4.9568	4.9568	4.9568
13	Apporti interni zona giorno	W/m <sup>2</sup>	2.5664	2.5664	2.5664	2.5664	2.5664
14	Apporti interni zona notte	W/m <sup>2</sup>	2.5443	2.5443	2.5443	2.5443	2.5443
15	Ventilazione zona giorno	Vol/hr	17	17	9	9	17
16	Ventilazione zona notte	Vol/hr	21	21	25	25	0
17	Infiltrazione zona scale	Vol/hr	0.7711	0.7711	0.7711	0.7711	0.7711
18	Infiltrazione zona giorno	Vol/hr	0.1694	0.1694	0.2289	0.212	0.4567
19	Infiltrazione zona notte	Vol/hr	0.6787	0.6787	0.6787	0.6787	0.5944

I parametri generati dal processo di calibrazione sono identici per quelli che descrivono le proprietà fisiche della costruzione (conducibilità, conduttività e resistenza termica) e per gli apporti interni, gli unici che subiscono una variazione evidente sono quelli relativi alla ventilazione e all'infiltrazione.

**Tabella 4.8 Consumi generati dal processo di ottimizzazione**

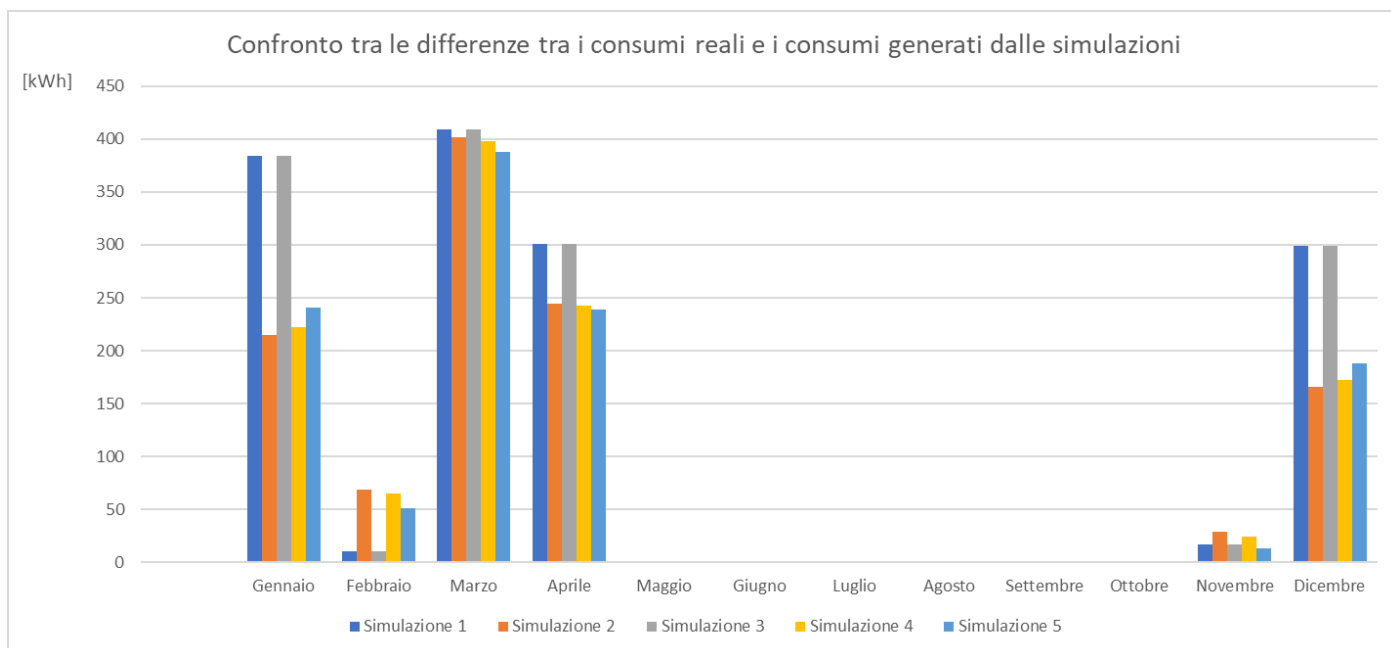
Anno	Mese	Consumi reali [kWh]	Simulazione 1 [kWh]	Simulazione 2 [kWh]	Simulazione 3 [kWh]	Simulazione 4 [kWh]	Simulazione 5 [kWh]
2017	Gennaio	2037.61	2421.79286	2252.405125	2421.79286	2259.53612	2278.20633
	Febbraio	1510.56	1520.946045	1442.205481	1520.946045	1445.961859	1459.954918
	Marzo	1323.38	914.3662118	921.8857363	914.3662118	925.6123265	935.579178
	Aprile	571.39	270.0809021	326.7598605	270.0809021	328.5499575	332.8898839
	Maggio	0.00	0	0	0	0	0
	Giugno	0.00	0	0	0	0	0
	Luglio	0.00	0	0	0	0	0
	Agosto	0.00	0	0	0	0	0
	Settembre	0.00	0	0	0	0	0
	Ottobre	0.00	0	0	0	0	0
	Novembre	1287.54	1304.321285	1259.080284	1304.321285	1263.486129	1274.20111
	Dicembre	1701.80	2000.734433	1867.910339	2000.734433	1874.099314	1889.859029



**Grafico 4.8 Confronto dei consumi per il riscaldamento invernale: Consumi reali – Simulazioni**

**Tabella 4.9 Differenze tra consumi reali e consumi generati dalle simulazioni**

Anno	Mese	Consumi reali [kWh]	Simulazione 1	Simulazione 2	Simulazione 3	Simulazione 4	Simulazione 5
2017	Gennaio	2037.61	384.18	214.79	384.18	221.92	240.59
	Febbraio	1510.56	10.39	68.35	10.39	64.60	50.60
	Marzo	1323.38	409.01	401.50	409.01	397.77	387.80
	Aprile	571.39	301.30	244.63	301.30	242.84	238.50
	Maggio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Giugno	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Luglio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Agosto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Settembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ottobre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Novembre	1287.54	16.78	28.46	16.78	24.06	13.34
	Dicembre	1701.80	298.94	166.11	298.94	172.30	188.06
<b>TOT</b>			<b>1420.60</b>	<b>1123.84</b>	<b>1420.60</b>	<b>1123.49</b>	<b>1118.90</b>



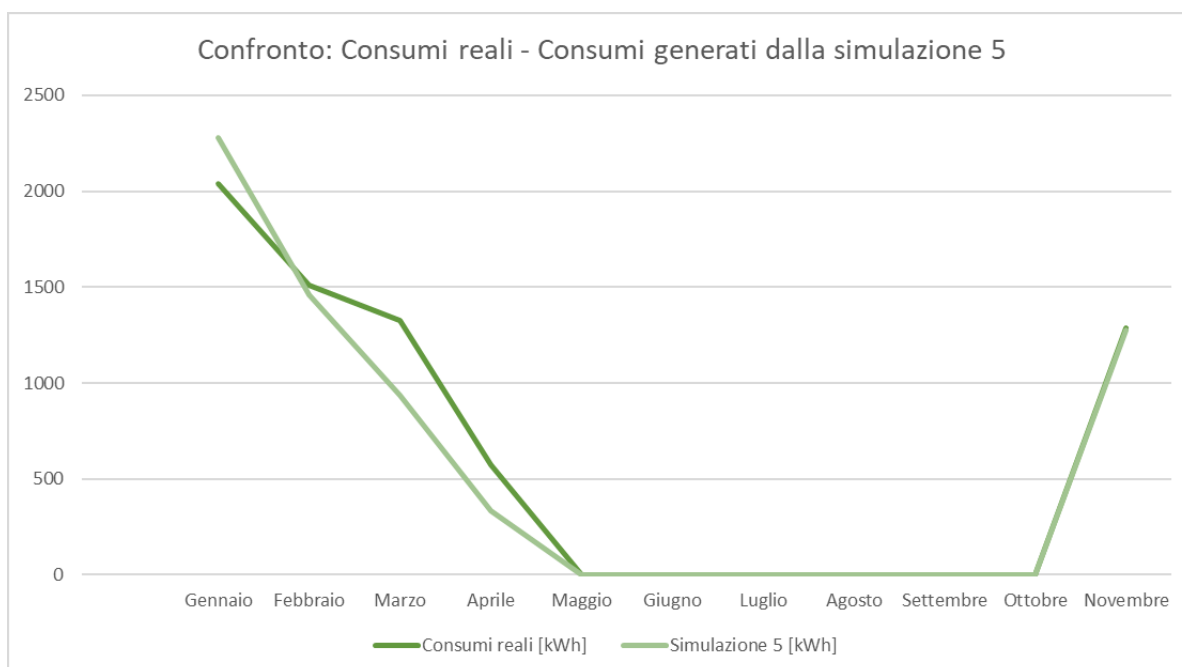
**Grafico 4.9 Confronto delle differenze dei consumi reali e quelli generati dalle simulazioni**

Come possiamo notare dalle tabelle e dai grafici precedenti il processo di calibrazione ha portato ad un miglioramento, riducendo le differenze dei consumi

invernali. Nel grafico soprastante possiamo vedere come le simulazioni 1 e 2 abbiano maggiori differenze rispetto le altre.

Mettendo a confronto il grafico soprastante (grafico 4.9) con il grafico 4.4 (pag. 41), possiamo evidenziare un netto miglioramento della precisione nei dati di output prodotti dai modelli generati dalla calibrazione, poichè si sono ridotte le notevoli differenze che prima avevamo soprattutto nel mese di Marzo.

Facendo riferimento alla simulazione 5, che produce una differenza totale dei consumi inferiore rispetto alle altre, otteniamo il seguente grafico di confronto.



**Grafico 4.10 Confronto: Consumi reali - Consumi generati dalla simulazione 5**

Il grafico ci permette di notare come il processo di ottimizzazione ci abbia permesso di ridurre le differenze con i consumi reali (Grafico 4.3).





## CONCLUSIONI

In questa tesi è stato svolto uno studio sui settaggi dell'algoritmo di ottimizzazione, analizzando l'influenza che essi provocano sul processo. Successivamente si è eseguita la calibrazione dell'interno di un edificio sito nella città di Ancona. Lo studio dell'edificio è stato svolto su dati delle proprietà fisiche e sui consumi fornicici Wave Srl. I dati sono poi stati implementati su software appositi di modellazione e di simulazione energetica dinamica.

Avendo analizzato l'influenza degli iperparametri dell'algoritmo di ottimizzazione utilizzato (NSGA-II) sul risultato del processo di calibrazione, è possibile constatare come il parametro "Number of Generation" sia di fatto il parametro più importante nel processo di calibrazione. Viceversa, il parametro "Population size" sembrerebbe avere scarsa rilevanza. Ulteriori analisi ed approfondimenti dovranno tuttavia essere effettuati al fine di garantire una maggiore generalità al risultato ottenuto.



## INDICE DELLE FIGURE

Figura 3.1 Edificio caso studio, estratto daGoogle Earth .....	11
Figura 3.2 piante dell'edificio .....	12
Figura 3.3 Pianta piano primo e localizzazione dell'interno 2.....	13
Figura 3.4 Stratigrafia muro M1 .....	14
Figura 3.5 Stratigrafia muro M2 .....	14
Figura 3.6 Stratigrafia muro M3 .....	15
Figura 3.7 Stratigrafia solaio controterra .....	15
Figura 3.8 Stratigrafia solaio interpiano, terrazzo, tetto piano .....	16
Figura 3.9 Modello dell'edificio.....	19

## INDICE DEI GRAFICI

Grafico 3.1 Programma di accensione della zona giorno .....	22
Grafico 3.2 Programma di accensione della zona notte .....	22
Grafico 3.3 Andamento Temperatura a bulbo secco Ancona 2017 .....	23
Grafico 3.4 Consumi gloali per il riscaldamento dell'edificio caso studio .....	25
Grafico 3.5 Consumi mensili per il riscaldamento dell'interno 2 .....	28
Grafico 3.6 Temperature mensili Edil Clima .....	29
Grafico 3.7 Dati climatici Desing Builder .....	30
Grafico 3.8 Distribuzione uniforme .....	32
Grafico 4.1 Andamento dei consumi ideali dell'edificio caso studio (Anno 2002) .....	39
Grafico 4.2 Andamento dei consumi ideali dell'edificio caso studio (Anno 2003) .....	39
Grafico 4.3 Confronto dei dati dei consumi dell'interno .....	41
Grafico 4.4 Differenze tra i consumi reali e i consumi generati dalla simulazione iniziale .....	41
Grafico 4.5 Grafico a bolle, variazione NMBE.....	44
Grafico 4.6 Grafico a bolle, variazione CVRMSE.....	46
Grafico 4.7 Curva di pareto .....	47
Grafico 4.8 Confronto dei consumi per il riscaldamento invernale: Consumi reali – Simulazioni .....	49
Grafico 4.9 Confronto delle differenze dei consumi reali e quelli generati dalle simulazioni.....	50
Grafico 4.10 Confronto: Consumi reali - Consumi generati dalla simulazione 5.....	51

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 Parametri NSGA-II .....	6
Tabella 3.1 Componenti finestrati .....	16
Tabella 3.2 Tabella apporti interni per interno .....	21
Tabella 3.3 Consumi globali dell'edificio caso studio, periodo 2016/2017 .....	24
Tabella 3.4 Consumi globali dell'edificio caso studio, periodo 2017/2018 .....	25
Tabella 3.5 Consumi dell'interno 2 reali, periodo 2016/2017 .....	27
Tabella 3.6 Consumi dell'interno 2 reali, periodo 2017/2018 .....	27
Tabella 3.7 Range dei valori dei parametri .....	32
Tabella 3.8 Valori degli operatori generici inseriti in JE+EA .....	34
Tabella 3.9 Consumi per il riscaldamento invernali dell'interno 2 (funzione obbiettivo) .....	35
Tabella 4.1 Confronto dei consumi ideali di Edil Clima e Desing Builder (anno 2002 e 2003) .....	38
Tabella 4.2 Consumi per il riscaldamento invernale dell'interno 2, simulazione iniziale .....	40
Tabella 4.3 Valori iniziali dei parametri dell'interno 2 .....	42
Tabella 4.4 Variazione dell'indice NMBE .....	43
Tabella 4.5 Variazione CVRMSE .....	45
Tabella 4.6 Simulazioni analizzate .....	48
Tabella 4.7 Valori finali di ogni parametro delle simulazioni studiate .....	48
Tabella 4.8 Consumi generati dal processo di ottimizzazione .....	49
Tabella 4.9 Differenze tra consumi reali e consumi generati dalle simulazioni .....	50



## BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

- [1] ANSI/ASHRAE, “ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings,” Ashrae, vol.
- [2] D. Coakley, P. Raftery, and M. Keane “A review of methods to match building energy simulation models to measured data”
- [3] S. Martínez, P. Eguía, E. Granada, A. Moazami, M. Hamdy, A performance comparison of multi-objective optimization-based approaches for calibrating white-box building energy models., *Energy and Buildings*. 216 (2020). doi:10.1016/j.enbuild.2020.109942.
- [4] K. Li, L. Pan, W. Xue, H. Jiang, H. Mao, Multi-Objective Optimization for Energy Performance Improvement of Residential Buildings: A Comparative Study, *Energies*. 10 (2017). doi:10.3390/en10020245.
- [5] S. Zuhaib, M. Hajdukiewicz, J. Goggins, Application of a staged automated calibration methodology to a partially-retrofitted university building energy model, *Journal of Building Engineering*. 26 (2019) 100866.
- [6] G. Ramos Ruiz, C. Fernández Bandera, Analysis of uncertainty indices used for building envelope calibration, *Applied Energy*. 185 (2017) 82–94. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.054.
- [7] G. Ramos Ruiz, C. Fernández Bandera, T. Gómez-Acebo Temes, A. Sánchez-Ostiz Gutierrez, Genetic algorithm for building envelope calibration, *Applied Energy*. 168 (2016) 691–705. doi:10.1016/j.apenergy.2016.01.075.
- [8] Andrew Marsh, “Weather 3D.”  
<http://andrewmarsh.com/apps/staging/weather-data.html>.
- [9] Daniele di Giorgio, “Introduzione alla Simulazione Energetica in Regime Dinamico degli Edifici nZEB”.

<https://www.mygreenbuildings.org/2015/05/05/simulazione-energetica-dinamica-edifici-nzeb.html>

- [10] Alberto Gallotta, "“Simulazioni energetiche: stazionarie, semi-stazionarie, dinamiche” <https://www.architetturaecosostenibile.it/green-life/curiosita-ecosostenibili/simulazioni-energetiche-stazionarie-dinamiche-403>
- [11] M. Hamdy, A. T. Nguyen, and J. L. M. Hensen, “A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems,” *Energy Build.*, vol. 121 pp. 57–71, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.035.
- [12] G. R. Ruiz and C. F. Bandera, “Validation of calibrated energy models: Common errors,” *Energies*, vol. 10, no. 10, 2017, doi: 10.3390/en10101587.