



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

FACOLTA' DI INGEGNERIA

---

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile, Architettura

**EFFETTI DEL COMPORTAMENTO DEGLI OCCUPANTI SULLA CALIBRAZIONE DEI  
MODELLI ENERGETICI: SIMULAZIONE E CALIBRAZIONE DI UN EDIFICIO  
RESIDENZIALE DI EDILIZIA POPOLARE**

**Effects of occupant behaviour on the calibration of energy models:  
simulation and calibration of a social housing building**

**Relatore:**

Prof. Ing. Arch. Marco D'Orazio

**Tesi di Laurea di:**

Noemi Strazzi

**Correlatore:**

Prof. Ing. Gianluca Maracchini

A.A. 2021/2022

# 1. INDICE

1.	INDICE .....	1
2.	INDICE DELLE IMMAGINI .....	3
3.	INTRODUZIONE .....	8
4.	STATO DELL'ARTE.....	11
4.1	La calibrazione dei modelli energetici.....	11
4.2	Contabilizzazione dell'influenza degli occupanti sul processo di calibrazione	15
4.3	Analisi dello stato dell'arte sulla calibrazione di modelli che includono dati sull'occupazione .....	16
4.4	Gap di ricerca e obiettivo della tesi .....	28
5.	FASI, MATERIALI E METODI.....	29
5.1	Fasi.....	29
5.2	Materiali .....	31
5.2.2	L'edificio caso studio.....	31
5.2.2.1	Descrizione dell'involucro opaco.....	34
5.2.2.2	Descrizione dell'involucro trasparente .....	38
5.2.2.3	Descrizione degli impianti di raffrescamento .....	39
5.2.3	Dati climatici .....	41
5.3	Metodi.....	43
5.3.1	Monitoraggio sperimentale dell'ambiente interno.....	43
5.3.2	Modellazione del caso di studio .....	47
5.3.2.1	Definizione del file climatico .....	49
5.3.2.2	Definizione dell'involucro dell'edificio .....	50
5.3.2.3	Definizione dell'impianto di raffrescamento .....	54

5.3.2.4	Definizione del contesto.....	55
5.3.3	Calibrazione del caso di studio .....	56
6.	RISULTATI .....	59
6.1	Monitoraggio sperimentale dell'ambiente interno .....	59
6.1.1	Appartamenti non occupati.....	59
6.1.2	Appartamento occupato.....	60
6.2	Creazione dei profili di occupazione nel modello .....	65
6.3	Confronto tra dati simulati e misurati.....	71
6.3.1	Appartamenti non occupati.....	71
6.3.2	Appartamenti occupati .....	79
6.4	Calibrazione del modello energetico .....	81
6.4.1	Calibrazione del modello per gli appartamenti sfitti .....	81
6.4.2	Calibrazione del modello con le informazioni sull'occupazione.....	89
7.	CONCLUSIONI.....	97
8.	Bibliografia .....	99

## 2. INDICE DELLE IMMAGINI

Immagine 1: Grafici rappresentativi delle tipologie di edifici studiati e sulle modalità di reperimento dei dati .....	18
Immagine 2: Grafico rappresentativo delle tipologie di metodi utilizzati per la contabilizzazione dell'occupazione .....	18
Immagine 3: Inquadramento territoriale dell'edificio .....	31
Immagine 4: Documentazione fotografica .....	31
Immagine 5: Pianta del secondo piano dell'edificio caso studio .....	32
Immagine 6: Prospetto Ovest dell'edificio caso studio .....	32
Immagine 7: Prospetto Est dell'edificio caso studio .....	33
Immagine 8: Prospetto sud dell'edificio caso studio .....	33
Immagine 9: Prospetto Nord dell'edificio caso studio .....	33
Immagine 10: Stratigrafia M1, M2, Stratigrafia M3/M4 .....	35
Immagine 11: Stratigrafia M5 .....	35
Immagine 12: Stratigrafia M6/M7 .....	36
<i>Immagine 13: Stratigrafia P2/S2 .....</i>	<i>37</i>
Immagine 14: Stratigrafia vetro W1 W2 .....	39
Immagine 15: Stralcio Scheda Tecnica unità interna M2OG-14HFN8-Q .....	39
Immagine 16: Schemi dimensionali split esterni .....	39
Immagine 17: Stralcio Scheda Tecnica unità esterna M2OG-14HFN8-Q .....	40
Immagine 18: Schema dimensionale unità esterna .....	40
Immagine 19: Sito Arpae-SIMC .....	41
Immagine 20: Localizzazione stazione metereologica di Correggio, presa dal sito dell'Arpae-SIMC .....	41
Immagine 21: Assonometria dell'edificio con diagramma solare relativo alla giornata del 02/09/2021 .....	42
Immagine 22: Sensore ERS CO2 .....	44
Immagine 23: Sensore EMS DOOR. ....	44
Immagine 24: Pianta del piano secondo con disposizione sensori .....	46

Immagine 25: Gerarchia di selezione dati nel software Design Builder .....	47
Immagine 26: Schermata iniziale edificio caso studio Design Builder .....	48
Immagine 27: Schermata Elements con File climatico 2021 – Correggio .....	49
Immagine 28: Definizione stratigrafia solaio di copertura su Design Builder .....	50
Immagine 29: Definizione stratigrafia solaio di interpiano su Design Builder .....	51
Immagine 30: Definizione stratigrafia Muratura perimetrale su Design Builder .....	51
Immagine 31: Definizione Stratigrafia Pareti divisorie interne su Design Builder ....	52
Immagine 32: Design Builder, definizione del funzionamento delle porte.....	52
Immagine 33: definizione sul modello Design Builder dei dispositivi schermanti dell'appartamento D2-P .....	52
Immagine 34: Schermata Design Builder, divisione delle zone climatiche .....	53
Immagine 35: Design Builder, definizione del sistema HVAC.....	54
Immagine 36: Design Builder, definizione dell'impianto interno ad ogni appartamento .....	54
Immagine 37: Schermata del contesto dell'edificio caso studio Design Builder.....	55
Immagine 38: BEMCalibration Tool .....	56
Immagine 39: Schermata del file config.json all'interno del Tools .....	57
Immagine 40: all'andamento della temperatura rilevato dai sensori co2-6 e co2-7 relativi alla giornata del 02/09/2021 .....	59
Immagine 41: andamento dei consumi di energia relativi alla giornata del 02/09/2021 .....	60
Immagine 42: occupazione del soggiorno nella giornata del 06/09/2021.....	61
Immagine 43: occupazione del soggiorno nella giornata del 06/09/2021.....	61
Immagine 44: concentrazione di anidride carbonica del soggiorno nella giornata del 06/09/2021 .....	61
Immagine 45: temperatura interna del soggiorno nella giornata del 06/09/2021...	62
Immagine 46: irradianza globale media registrata nella provincia di Reggio Emilia in giorno 06/09/21.....	63
Immagine 47: apporto luminoso rilevato nel soggiorno nella giornata del 06/09/2021 .....	63

Immagine 48: stato dei dispositivi di schermatura del soggiorno nella giornata del 06/09/2021 .....	63
Immagine 49: energia consumata nell'appartamento occupato nella giornata del 06/09/21 .....	64
Immagine 50: andamento della temperatura rilevato dai sensori co2-11 e co2-12 relativi alla giornata del 06/09/2021 .....	64
Immagine 51: stato dell'impianto di raffrescamento nella giornata del 06/09/2021 .....	64
Immagine 52: Esempio dell'andamento della temperatura e dei consumi nell'appartamento A1-SOGGIORNO .....	72
Immagine 53: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento A .....	73
Immagine 54: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento A .....	73
Immagine 55: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento B .....	74
Immagine 56: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento B .....	74
Immagine 57: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento C .....	75
Immagine 58: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento C .....	75
Immagine 59: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento D .....	76
Immagine 60: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento D .....	76
Immagine 61: Confronto tra i consumi misurati e simulati nell'appartamento A ....	77
Immagine 62: Confronto tra i consumi misurati e simulati nell'appartamento B ....	77
Immagine 63: Confronto tra i consumi misurati e simulati nell'appartamento C ....	78
Immagine 64: Confronto tra i consumi misurati e simulati nell'appartamento D ....	78

Immagine 65: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento E .....	80
Immagine 66: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento E.....	80
Immagine 67: File “problem” relativo all’analisi di sensitività .....	81
Immagine 68: Grafico dei consumi giornalieri dell’appartamento A .....	83
Immagine 69: Grafico dei consumi giornalieri dell’appartamento B .....	83
Immagine 70: Grafico dei consumi giornalieri dell’appartamento C .....	83
Immagine 71: Grafico dei consumi giornalieri dell’appartamento D .....	84
Immagine 72: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento A soggiorno .....	85
Immagine 73: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento A camera da letto .....	85
Immagine 74: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento B soggiorno.....	86
Immagine 75: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento B camera da letto .....	86
Immagine 76: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento C soggiorno.....	87
Immagine 77: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento C camera da letto .....	87
Immagine 78: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento D soggiorno .....	88
Immagine 79: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento D camera da letto.....	88
Immagine 82: Grafico di confronto tra i valori dei consumi dell’appartamento E....	90
Immagine 83: Grafico di confronto delle medie dei valori di temperatura del soggiorno .....	91
Immagine 84: Grafico di confronto delle medie dei valori di temperatura della camera da letto.....	91

Immagine 85: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata con e senza info occupanti – Appartamento E soggiorno .....	92
Immagine 86: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata con e senza info occupanti – Appartamento E camera da letto .....	92
Immagine 85: Grafico di confronto tra i consumi di tutti gli alloggi analizzati.....	93
Immagine 86: Grafico di confronto temperature medie soggiorni .....	95
Immagine 87: Grafico di confronto temperature medie camere da letto .....	96

### 3. INTRODUZIONE

Con oltre il 40% del consumo energetico e il 36% dell'emissione di CO<sub>2</sub>, il settore edilizio europeo è uno dei principali componenti che causano il riscaldamento globale. Esso rappresenta, inoltre, anche un enorme potenziale di miglioramento attraverso il retrofit del patrimonio edilizio esistente e la costruzione di nuovi edifici efficienti.

È quindi fondamentale migliorare l'efficienza energetica degli edifici se si vogliono raggiungere gli obiettivi climatici di lungo periodo. In Italia il settore edilizio è, insieme ai trasporti, l'unico che ha aumentato le proprie emissioni dal 1990 a oggi; queste in particolare sono causate per il 70 % da edifici residenziali e per il 30% da edifici commerciali e pubblici. Questi ultimi però inquinano singolarmente molto di più: sono più grandi, più vecchi, e di solito ricevono meno manutenzione rispetto alle abitazioni.

Questo discorso si collega indubbiamente al retrofit energetico degli edifici, che si può migliorare, agevolando e promuovendo l'uso di fonti rinnovabili, la cui quota per il riscaldamento è aumentata, in Italia, di solo il 4% dal 2008; a differenza di altri paesi, quali Francia e Spagna, in cui aumento arriva fino al 9%.

Il problema italiano sta nel fatto che il patrimonio edilizio è molto vecchio, e gran parte degli edifici è stato progettato e realizzato prima delle vigenti normative energetiche e antisismiche, con materiali e tecnologie caratterizzate da prestazioni ben diverse da quelle moderne, tanto che il consumo energetico di questi edifici è di circa quattro volte rispetto ai nuovi edifici.

Per questo motivo, svolge un ruolo fondamentale la simulazione energetica degli edifici (BES) sia sotto l'ottica della progettazione architettonica che per l'analisi di retrofit e per ottimizzare il funzionamento e i controlli dell'edificio.

Attualmente, la modellazione è una parte essenziale della progettazione degli edifici. Gli strumenti di modellazione e simulazione degli edifici vengono utilizzati per valutare la conformità normativa prevedendo la prestazione energetica, le emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte e mitigate, l'analisi del surriscaldamento e l'interazione dell'edificio con i suoi ambienti esterni e interni.

Il problema della modellazione sta nel divario di prestazione, infatti gli edifici in esercizio, nella maggior parte dei casi, non garantiscono le prestazioni energetiche stabilite durante la progettazione ed anche i consumi energetici si discostano da quelli previsti da calcolo; in particolare è stato dimostrato [1] che la prestazione energetica dell'edificio reale è significativamente diversa rispetto alla prestazione energetica dell'edificio modellato, anche quando l'edificio modellato è una riproduzione dell'edificio.

Per ovviare a questo problema di divario prestazionale, è necessario calibrare il modello energetico, sulla base di dati misurati, per migliorarne l'accuratezza e dunque l'attendibilità delle simulazioni.

Le metodologie di calibrazione dei modelli energetici degli edifici possono essere semplificate o maggiormente dettagliate ed è importante considerare l'identificazione dei parametri di input che maggiormente influenzano l'output del modello, i criteri da valutare e i parametri di soglia per poter considerare calibrato un modello.

Tra i parametri che comportano maggiore incertezza nella calibrazione degli edifici esistenti c'è il comportamento degli occupanti. Negli ultimi anni è aumentato l'interesse per la modellazione di tale aspetto, pertanto, per quanto il monitoraggio dei comportamenti interni agli edifici sia un modo affidabile per controllare l'incertezza della calibrazione, durante le campagne di misurazione possono verificarsi problemi legati alla privacy, soprattutto per quanto riguarda gli edifici con destinazione d'uso residenziale.

A tal proposito, la seguente tesi, ha l'obiettivo di determinare l'impatto che ha l'utilizzo delle informazioni sull'occupazione nel processo di calibrazione energetica di un edificio considerando diversi livelli di conoscenza.

La tesi è articolata nelle fasi seguenti: il primo passo è stato quello di analizzare i risultati prodotti in output dai sensori posizionati all'interno degli appartamenti oggetto di studio.

A seguito dell'analisi, sono state attuate delle semplificazioni nei dati, così da ridurre gli intervalli di dati da cinque minuti a fasce orarie, successivamente l'edificio caso studio è stato modellato all'interno del Software Design Builder definendo l'involucro, gli impianti di raffrescamento installati all'interno e i profili comportamentali, impostati grazie all'analisi di sensori di movimento, dati di consumo e altri sensori.

Poi, a seguito della simulazione, sono stati in un primo momento confrontati i risultati da DB e i dati misurati, differenziando il confronto tra appartamenti sfitti e l'appartamento occupato.

Infine, il modello è stato calibrato, in un primo momento includendo solo gli appartamenti sfitti e poi calibrando il modello inserendo anche i dati sull'occupazione.

## 4. STATO DELL'ARTE

Lo stato dell'arte è stato impostato per fasi:

1. Ricerca in letteratura sull'accuratezza della calibrazione dei modelli energetici
2. Ricerca in letteratura dello stato dell'arte riguardante la modellazione del comportamento degli occupanti
3. Ricerca in letteratura dello stato dell'arte riguardante la contabilizzazione dell'influenza degli occupanti sull'accuratezza della calibrazione di un modello energetico

### 4.1 La calibrazione dei modelli energetici

La calibrazione è definita come processo di regolazione dei parametri di modellazione numerica o fisica nel modello computazionale allo scopo di migliorare l'accordo con i dati sperimentali. Successivamente al processo di calibrazione, segue una convalida. Questo è il processo per determinare il grado in cui un modello è una rappresentazione accurata del mondo reale dal punto di vista degli usi previsti del modello.

Per la simulazione oltre il 60% degli articoli analizzati utilizza Energy Plus. La maggior parte dei casi studio si trova in Europa o negli Stati Uniti caratterizzati per lo più da clima arido e secco e temperato (mite) (solo 4% clima equatoriale, caldo e umido). Si tratta soprattutto di studi fatti su scala edilizia urbana.

A seguito dello studio [2] che ha analizzato 121 edifici LEED è stato scoperto che il consumo energetico misurato può essere compreso tra 0,5 e 2,75 volte il consumo energetico previsto; inoltre, è stato mostrato che le impostazioni e i metodi predefiniti di modellazione della massa termica possono comportare una divergenza fino al 26% nelle previsioni di simulazione.

In particolar modo si analizzano diversi casi studio di calibrazione, raggiungendo la conclusione che, per quanto i risultati indichino un aumento esponenziale di approcci

di calibrazione automatizzati, questa rimane comunque una procedura impegnativa poiché non ci sono linee guida chiare sulle procedure di calibrazione come input e output del modello, metodi, valutazione delle prestazioni e riproducibilità delle simulazioni.

Queste sono le ragioni che rendono particolarmente attuale la calibrazione dei modelli di simulazione energetica sulla base di dati misurati, sia come strumento per validare e raffinare la costruzione di modelli di simulazione di edifici esistenti, sia per valutarne l'accuratezza.

Gli aspetti da considerare per effettuare la calibrazione di un modello riguardano l'identificazione dei parametri di input che maggiormente influenzano l'output del modello, i criteri da valutare e i parametri di soglia per poter considerare calibrato un modello.

In base al tipo di disponibilità dei dati e al livello di dettagli di questi, [3] sono anche stati definiti 5 livelli di complessità della calibrazione:

- Livello 1: vengono prese in considerazione solo bollette energetiche; dunque, dati di consumo energetico mensili o annuali
- Livello 2: i dati disponibili nel "livello 1", vengono integrati da ispezioni visive per definire caratteristiche quali geometria dell'edificio o occupazione delle zone
- Livello 3: le informazioni possono essere ottenute da dettagliate verifiche in loco attraverso l'utilizzo di strumenti di misura. Queste misurazioni possono essere effettuate in diversi momenti della giornata ma rimangono puntuali
- Livello 4: A questo livello vengono installati in loco strumenti di misura per misurare diverse variabili (temperature, energia termica o elettrica, umidità) in un periodo di tempo relativamente breve a brevi intervalli di tempo (da minuti alle ore). Qui la calibrazione può essere effettuata su altre variabili oltre al semplice consumo energetico mensile, come le temperature di zona o le potenze termiche o elettriche.

- Livello 5: prevede una strumentazione pressoché esaustiva, che è installata permanentemente sull'edificio. Non ci sono limiti alla durata del monitoraggio, il che significa che di solito sono disponibili diversi anni di dati. L'intervallo di registrazione è sufficientemente piccolo da catturare la dinamica di fenomeni transitori rapidi (della grandezza di un minuto).

Per valutare l'accuratezza della calibrazione e, di conseguenza, per validare il modello calibrato, si utilizzano degli indici statistici, in norma tecnica e in letteratura. Per quanto essi non rappresentino una metodologia per la calibrazione, vengono comunque impiegati per misurare il grado di accuratezza del modello.

I due indici più utilizzati sono l'errore quadratico medio (Mean Bias Error, MBE), che indica la discrepanza quadratica media fra i valori della prestazione energetica misurata ed i valori di quella stimata e il coefficiente di variazione della radice del MBE (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (CV(RMSE))) che è una misura della deviazione campione delle differenze tra i valori misurati ed i valori previsti dal modello. Solitamente, per valutare un modello vengono utilizzati entrambi gli indici.

I valori di soglia per considerare o meno un modello calibrato sono reperibili nelle ASHRAE Guidelines 14 in funzione dell'intervallo temporale di calibrazione considerato, orario o mensile. L'MBE deve rispettare i valori limite di  $\pm 5$  e  $\pm 10$  rispettivamente per l'intervallo mensile e orario. Analogamente i valori limite di 15 e 30 per l'intervallo mensile e orario devono essere rispettati per il CV(RMSE).

Validation criteria for BES models.				
Organization/Guideline	Monthly calibration		Hourly calibration	
	CvRMSE [%]	NMBE [%]	CvRMSE [%]	NMBE [%]
IPMVP [31]	-	20	20	5
ASHRAE - Guideline 14 [32]	15	5	30	10
FEMP - M&V Guidelines [33]	15	5	30	10

Tabella 1: Limiti di errore secondo la ASHRAE Guidelines

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

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

$m_i$  : valori misurati,  $s_i$  : valori simulati,  $\bar{m}$  : media dei valori misurati,

$n$  : numero di punti dati,  $p$  : numero di parametri del modello regolabili

Un'altra delle caratteristiche principali da tenere in considerazione per i modelli BES è l'incertezza. Proprio da qui, secondo [4] e [5] ha origine il divario prestazionale, distribuito nelle diverse fasi dell'edificio: la progettazione, la costruzione e il funzionamento. In questo articolo vengono definite:

- L'incertezza sulle specifiche, che deriva dall'imprecisione di informazioni riguardanti la geometria dell'edificio e le proprietà dei sistemi di riscaldamento, raffrescamento e aria condizionata;
- L'incertezza di modellazione, derivante invece da ipotesi o semplificazioni attuate nei modelli utilizzati nel programma BES.

In particolare, in [6] si parla di incertezza aleatoria (o irriducibile), come quella causata da variazioni intrinseche o casualità del sistema edilizio o sottosistema oggetto di indagine che non possono essere spiegate dai dati raccolti. Mentre, l'incertezza epistemica (o incertezza riducibile) è l'incertezza che deriva da una mancanza di conoscenza (o di dati). La distinzione tra queste ha il compito di guidare le incertezze che hanno il potenziale di ridursi. Tuttavia, lo sviluppo di modelli BES implica un grado significativo di soggettività che dipende dai dati disponibili che possono anche evolversi durante il ciclo di vita di un edificio. Di conseguenza, la maggior parte delle incertezze è spesso una combinazione di incertezza sia aleatoria che epistemica, rendendo difficile la distinzione tra le due.

Secondo [7] e [6] le principali cause delle discrepanze tra le prestazioni energetiche previste ed effettive derivano da: incertezza delle specifiche derivante da ipotesi dovute alla mancanza di informazioni; inadeguatezza del modello derivante da semplificazioni e astrazioni di sistemi fisici di costruzione effettivi; incertezza operativa derivante dalla mancanza di riscontri sull'uso e sul funzionamento effettivi degli edifici; e l'incertezza dello scenario derivante dalla specificità delle condizioni del modello, quali le condizioni meteorologiche e l'occupazione degli edifici.

Come appena descritto, le fonti più rilevanti di incertezza nella modellazione energetica degli edifici si possono identificare con il tasso di infiltrazione e la modellazione del comportamento degli occupanti.

## 4.2 Contabilizzazione dell'influenza degli occupanti sul processo di calibrazione

Come già detto, il comportamento degli occupanti rappresenta uno dei maggiori fattori di incertezza nella modellazione energetica degli edifici e di discrepanza tra la previsione della simulazione e il consumi reale di energia, oltre ad avere un impatto significativo sull'uso di energia negli edifici; questo perché, gli strumenti software commerciali non hanno l'attitudine a riprodurre le azioni dei singoli utenti negli edifici e l'imprevedibilità dei diversi comportamenti degli utenti nel corso del tempo.

Nel corso degli ultimi decenni il comportamento degli occupanti è stato descritto tramite modelli deterministici, è poi subentrato l'uso di modelli stocastici, che meglio rappresentano il comportamento reale degli occupanti.

Nel dettaglio in [8] sono descritte le due tipologie di approccio come segue:

- i modelli deterministici includono programmi e regole deterministiche. Gli orari o i fattori di diversità sono spesso rappresentati come frazioni nell'intervallo e mette in relazione le variazioni orarie di occupazione, illuminazione e carichi delle apparecchiature con la rispettiva occupazione massima o densità di potenza di picco.
- i modelli stocastici di occupazione e comportamento sono spesso proposti come alternativa ai modelli deterministici per spiegare in modo più realistico la natura stocastica dell'OB (occupant behaviour). In particolare, sono stati proposti modelli stocastici per rappresentare gli orari di arrivo e partenza, la durata dell'assenza e della presenza, e gli straordinari in modo più accurato. Inoltre, notevoli sforzi sono stati diretti allo sviluppo di modelli di occupanti

più dettagliati per catturare la complessità e l'ampia variabilità (sia spaziale che temporale) nel comportamento degli occupanti.

Sono, inoltre, revisionati gli approcci di modellazione del comportamento degli occupanti (OB), parametri di input relativi agli occupanti con particolare attenzione al programma di occupazione, all'illuminazione, al programma di utilizzo degli elettrodomestici, al programma del setpoint di temperatura e all'utilizzo dell'acqua calda sanitaria per la modellazione energetica degli edifici urbani. Vengono presentati ed evidenziati alcuni potenziali set di dati che potrebbero essere utilizzati per derivare input relativi agli occupanti a scala urbana. Si conclude osservando che la modellazione stocastica è preferita per prevedere carichi energetici realistici con un'elevata risoluzione temporale. La generazione di profili di occupazione utilizzando modelli stocastici aumenta l'affidabilità della simulazione energetica dell'edificio.

#### 4.3 Analisi dello stato dell'arte sulla calibrazione di modelli che includono dati sull'occupazione

Analizzando complessivamente gli articoli in letteratura tratti da Science Direct, che è un portale di informazione scientifica di casa Elsevier, è emerso che l'analisi degli effetti dell'occupazione sulla calibrazione di un modello energetico sia un argomento affrontato da diversi autori. Per quanto gli edifici pubblici e gli edifici a destinazione residenziale siano le tipologie edilizie maggiormente studiate, si riscontra una sostanziale differenza sulla metodologia di raccolta dei dati per quanto riguarda la prima categoria (biblioteche, edifici per uffici, aule, laboratori informatici, laboratori di progettazione e di ricerca) e la seconda.

Infatti, dalla Tabella 2 sottostante, che racchiude gli articoli considerati più pertinenti all'argomento, si evince che, per quanto riguarda gli edifici a destinazione residenziale, la raccolta dei dati presenta delle lacune in quanto, per motivi di privacy si riscontra la mancanza di raccolte dati sperimentali che includano l'installazione di sensori all'interno di ogni singola stanza; bensì la calibrazione avviene raccogliendo

dati tramite questionari o interviste agli occupanti e analisi delle bollette mensili o annuali.

Infatti, come possiamo vedere in [1], [9], [10], [11], [12], gli orario di presenza e assenza degli occupanti, così come le temperature di set point, l'utilizzo di apparecchiature e dispositivi elettrici sono indagati tramite interviste e questionari e sono implementati nella modellazione tramite la definizione di fasce orario giornaliera e rappresentati tramite profili stocastici. In [13] alle informazioni provenienti dalle interviste sono affiancati i dati proveniente dalle bollette mensili. In [14] e [15], il comportamento degli occupanti è modellato e successivamente calibrato tramite un approccio probabilistico, confrontato successivamente con una modellazione stocastica, e si evince una riduzione degli errori maggiore rispetto ai metodi deterministici e dei modelli probabilistico non calibrati.

Al contrario, per quanto riguarda gli edifici pubblici, la raccolta dati avviene sperimentalmente tramite l'uso di sensori di movimento.

La maggiore accuratezza di questi studi sta nel fatto che, grazie ai sensori di occupazione, si ha una panoramica più chiara dei possibili apporti e nella natura dell'edificio: infatti, in [5], [16], [17], [18], ai dati provenienti dai sensori, sono accoppiate anche schedule comportamentali ed informazioni sull'utilizzo dell'elettricità, che rendono più precisa la calibrazione del modello.

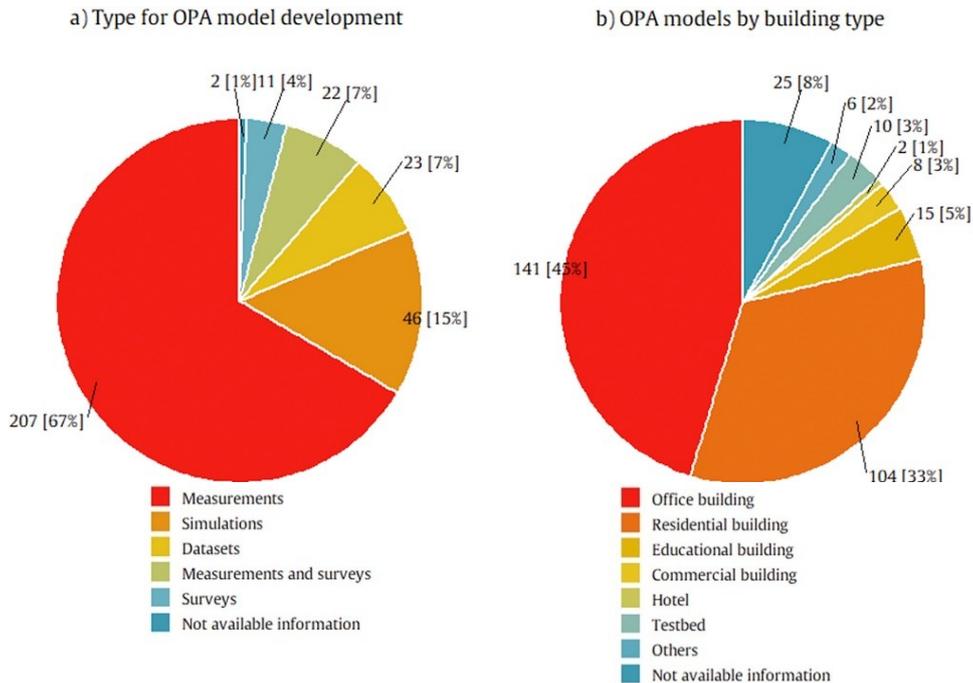


Immagine 1: Grafici rappresentativi delle tipologie di edifici studiati e sulle modalità di reperimento dei dati

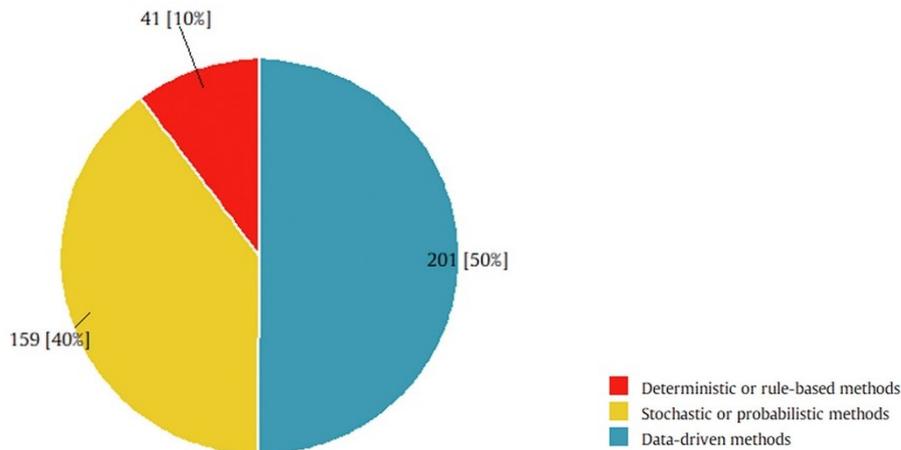


Immagine 2: Grafico rappresentativo delle tipologie di metodi utilizzati per la contabilizzazione dell'occupazione

Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** seguente è illustrata la sintesi dell'analisi svolta e, per ogni articolo vengono definiti:

- Destinazione d'uso degli edifici caso studio;
- Origine dei dati in input sull'occupazione;
- Risultati raggiunti (eventuale livello di accuratezza della calibrazione)

ANNO, RIF E DESTINAZIONE D'USO	OBIETTIVI E CONCLUSIONI	DATI IN INPUT	LIVELLO DI ACCURATEZZA (RISULTATI)
2022 [1] residenziale	In questo articolo, viene presentato un modello di simulazione applicato a 7 case unifamiliari nel Regno Unito. È emerso che, tra i dati considerati la temperatura di set point di riscaldamento ha l'influenza maggiore sulla domanda di energia simulata. l'effettiva domanda di energia dei casi studiati è stata utilizzata come base per il confronto con la domanda di energia modellata. Nonostante alcune case siano paragonabili per dimensioni e numero di occupanti, la loro domanda di energia varia notevolmente.	occupazione tramite questionari agli abitanti	discrepanza < 15% per tutti i casi studio
2020 [5] edificio per uffici	In questo articolo viene fatta una calibrazione di livello 5. In una prima fase della simulazione, si evince che il modello non può essere considerato calibrato, basandosi sulle linee guida basate su indicatori statistici calcolati sul consumo energetico mensile. Per spiegare questa discrepanza si sono studiate le informazioni disponibili sull'edificio e i dati di monitoraggio e procedendo con un'analisi dinamica a livello di zone, completata da un'analisi statica globale a livello di edificio, arrivando ad un ottimo accordo tra dati misurati e dati calibrati.	occupazione tramite sensori con output di dati ogni 5 minuti	NMBE e CvRMSE migliorati grazie all'uso di dati con frequenza di 5 minuti, rispetto all'uso di dati mensili
2021 [19] edificio per uffici	La metodologia di questo articolo riguarda il comportamento dell'illuminazione come caso di studio. Vengono utilizzati diversi scenari applicativi: un primo modello statistico e un secondo modello	-Il modello statistico  -Il modello deterministico	La valutazione dei modelli di comportamento degli

ANNO, RIF E DESTINAZIONE D'USO	OBIETTIVI E CONCLUSIONI	DATI IN INPUT	LIVELLO DI ACCURATEZZA (RISULTATI)
	<p>deterministico che si basa sulla probabilità che assume valore binario (0 o 1) se l'illuminazione si accenda o si spenga, entrambi applicati ad una sola stanza dell'edificio caso studio. Da questo studio si evince che, nonostante ciascun dei modelli di comportamento dell'illuminazione sia vantaggioso, non può essere appropriato il confronto tra una singola simulazione a singola esecuzione e la misurazione per la valutazione di modelli di comportamenti stocastici.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il modello di Hunt</li> <li>-Il modello di Wang</li> <li>-Il modello di Reinhart</li> </ul>	<p>occupanti dipende fortemente dagli scenari applicativi, che determinano gli indicatori di prestazione per la valutazione del modello.</p>
<p>2021 [9] Edilizia residenziale</p>	<p>In questo articolo sono analizzate due case all'interno dell'Istituto Fraunhofer per la fisica delle costruzioni. l'obiettivo è l'applicazione dell'ottimizzazione multi-obiettivo per caratterizzare le masse della superficie e dei materiali tamponatori di umidità profondi poiché le profondità di penetrazione dell'umidità sono difficili da stimare. in conclusione, è dimostrato che il buffering dell'umidità delle pareti ha un impatto significativo sull'umidità interna dell'edificio e le simulazioni energetiche dell'edificio devono modellare questo aspetto per prevedere con precisione l'RH negli edifici occupati.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- temperatur a di set point</li> <li>- occupazione tramite sondaggi e rappresentati tramite profili stocastici</li> </ul>	<p>Il CVRMSE di umidità relativa nella camera da letto è ridotto del 90% nella Twin House O5 e del 78% nella Twin House N2 utilizzando un modello EMPD calibrato.</p>
<p>2019 [13] Edilizia residenziale</p>	<p>Questa ricerca sviluppa un metodo che si basa sulla combinazione di valutazione energetica ed economica di soluzioni in quattro diversi scenari di consumo energetico, uno dalle</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- interviste agli occupanti</li> <li>- bollette energetiche</li> </ul>	<p>Per diversi scenari per abitazione, a parità di efficienza</p>

ANNO, RIF E DESTINAZIONE D'USO	OBIETTIVI E CONCLUSIONI	DATI IN INPUT	LIVELLO DI ACCURATEZZA (RISULTATI)
	condizioni operative standard della procedura nazionale di certificazione energetica (EPC) e gli altri, dai modelli di consumo energetico reali Questa procedura soddisfa due scopi principali delle procedure EPBD ed EPC, I risultati ottenuti mostrano che si possono ottenere variazioni significative tra i diversi scenari, raggiungendo, a parità di misura di efficienza energetica, dal 20 all'80% di risparmio energetico, a seconda del comportamento degli occupanti.		energetica, dal 20 all'80% di risparmio energetico, e fino a 20.000€ di variazione dei valori di VAN
2018 [10] Edilizia residenziale	In questo articolo viene presentato un metodo di calibrazione graduale per gli edifici residenziali viene proposto un modello di prestazione termica basato sui dati di consumo di calore orario, utilizzando i parametri relativi al comportamento degli occupanti, inclusi il carico interno) e tasso di ventilazione applicato ad un edificio Passive House in Italia. Si dimostra che l'utilizzo di tale standard nell'area mediterranea, caratterizzata da un clima mite, può essere discutibile e che la simulazione parametrica possono essere combinati con approcci di calibrazione basati sulla regressione, stabilendo una continuità tra la fase di progettazione e quella operativa.	- medie giornaliere indagate tramite interviste	il modello di regressione 2, con la scheda degli occupanti mostra un valore di CV pari al 2.67%
2019 [20] N.D.	In questo articolo è trattato un nuovo metodo di modellazione inversa che unisce il modello energetico dell'edificio basato sulla fisica con le misurazioni ambientali dell'edificio	- accensione e spegnimento o impianto	Il CVRMSE di tasso di infiltrazione raggiunge il 9%, nel caso

ANNO, RIF E DESTINAZIONE D'USO	OBIETTIVI E CONCLUSIONI	DATI IN INPUT	LIVELLO DI ACCURATEZZA (RISULTATI)
	per risolvere inversamente i tassi di infiltrazione dell'aria a livello di zona altamente incerti e il conteggio delle persone negli edifici. La nuova funzionalità di modellazione inversa sviluppata in EnergyPlus può migliorare l'accuratezza della simulazione degli edifici esistenti poiché riducono l'incertezza negli input del modello.		in cui viene utilizzato un approccio di simulazione inversa
2018 [14] Edificio residenziale	in questo articolo è descritto un metodo di calibrazione graduale per gli edifici residenziali e viene proposto un modello di prestazione termica basato sui dati di consumo di calore orario, includendo i parametri relativi al comportamento degli occupanti. Si conclude indicando la necessità di avere un metodo più rigoroso e quantitativo per eliminare l'influenza dei parametri relativi al comportamento degli occupanti nel processo di calibrazione dei parametri termici dell'edificio.	Modellazione probabilistica del comportamento degli utenti	Il CVMSE dopo aver effettuato la calibrazione raggiunge il valore massimo di 12,50%.
2018 [21] Edifici per uffici	Questo studio ha mostrato come determinare i dati energetici informativi per la calibrazione bayesiana del modello energetico dell'edificio, che può ridurre i tempi di calibrazione mantenendo risultati di calibrazione accurati. Con il modello migliorato, è possibile effettuare una valutazione più attenta della domanda di energia dell'edificio e delle misure di conversazione energetica, riducendo anche le	Programmi orari per setpoint per riscaldamento e raffrescamento, occupanti, luci e apparecchi	i casi che utilizzano solo dati sull'elettricità hanno valori CVMSE elevati per l'occupazione.

ANNO, RIF E DESTINAZIONE D'USO	OBIETTIVI E CONCLUSIONI	DATI IN INPUT	LIVELLO DI ACCURATEZZA (RISULTATI)
	incertezze derivando risultati stocastici.		
2017 [16] Edificio universitari o	In questo studio le informazioni relative ai programmi di occupazione relativi agli studenti dell'università sono state ottenute da sensori di occupazione. Tuttavia, il numero effettivo di occupanti nelle aule o nei laboratori non viene misurato. I dati ottenuti dai sistemi di gestione degli edifici (BMS) includevano solo dati consolidati sul consumo di elettricità di illuminazione, apparecchiature ed elettrodomestici per ogni piano. Tuttavia, gli strumenti di simulazione delle prestazioni degli edifici (BPS) come EnergyPlus richiedono programmi orari per ciascuna zona. Dunque, si conclude dicendo che servirebbero strumenti migliori per prevedere le opportunità di risparmio energetico e facilitare il processo decisionale.	Dati ottenuti tramite sensori di occupazione	L' MBE orario e il CV (RMSE) per l'energia di illuminazione e erano rispettivamente dello 0,03% e dello 0,07%. Mentre, per i carichi plug, MBE e CV (RMSE) orari erano dello 0,02% e dello 0,05%.
2017 [22] Piattaforma di ricerca	In questo studio la modellazione e la calibrazione di un sistema VRF vengono eseguite utilizzando il programma EnergyPlus modificato basato sui dati misurati dall'FRP. Il consumo energetico e le proprietà (ad es. temperatura e portata d'aria) di ciascuna unità del VRF-DOAS vengono misurati per 25 giorni durante i periodi di raffreddamento e riscaldamento. I processi di calibrazione in tre fasi principali tra cui la modifica del codice sorgente VRF-	l'illuminazione e altri carichi interni controllati con riscaldatori portatili pre-programmati per guadagni di calore	Il NMBE sui dati orari ha un valore del 6,4%.

ANNO, RIF E DESTINAZIONE D'USO	OBIETTIVI E CONCLUSIONI	DATI IN INPUT	LIVELLO DI ACCURATEZZA (RISULTATI)
	DOAS di EnergyPlus 8.1, calibrazione del carico dell'edificio e aggiornamenti del sistema VRF-DOAS per la calibrazione finale fino a quando il confronto statistico non mostra una corrispondenza accettabile secondo i criteri definito nella linea guida ASHRAE.	sensibili e umidificatori per guadagni di calore latente	
2017 [15] Edificio residenziale	in questo studio il metodo di calibrazione è stato applicato ad un quartiere residenziale della città del Kuwait con consumo energetico misurato annuo disponibile per 164 edifici. I risultati hanno mostrato che il metodo proposto era in grado di produrre un migliore adattamento simulato per la distribuzione reale dell'EUI, con una riduzione degli errori percentuali per i percentili maggiore rispetto ai metodi deterministici e dei modelli probabilistico non calibrati.	- Modellazione probabilistica e modellazione stocastica	Percentuale di errore del 13-45% rispetto ai metodi deterministici del 2-14% e rispetto ad un caso probabilistico non calibrato.
2017 [17] biblioteca	Questo articolo ha come caso studio una biblioteca, in cui il carico termico dovuto all'occupazione fluttua drasticamente. Sono state svolte varie fasi, la calibrazione migliore è risultata quella in cui si è tenuto conto della capienza di ogni piano, l'occupazione è stata distribuita di conseguenza, incorporando un profilo di occupazione giornaliera. Infatti, i risultati della calibrazione multistadio hanno mostrato un ottimo accordo nei consumi energetici e nelle temperature delle diverse zone dell'edificio. Inoltre, è stato ridotto il	- distribuzione e dell'occupazione giornaliera grazie all'utilizzo di sensori	CVRMSE orario è diminuito rispettivamente dal 128% al 31% e dal 156% al 16%

ANNO, RIF E DESTINAZIONE D'USO	OBIETTIVI E CONCLUSIONI	DATI IN INPUT	LIVELLO DI ACCURATEZZA (RISULTATI)
	tempo di calibrazione dell'intero sistema.		
2017 [18] uffici privati, uffici open space, aule, laboratori informatici, laboratori di progettazione, laboratori di ricerca, sale conferenze	Questo studio ha proposto una metodologia per calibrare le simulazioni energetiche degli edifici utilizzando i dati sull'utilizzo dell'elettricità a intervalli orari e i programmi di occupazione associati. Il metodo è stato stabilito per un case study di edifici per uffici e ulteriormente convalidato per due edifici del campus. È dimostrato quindi che l'accuratezza delle simulazioni energetiche dell'edificio è aumentata con i programmi di occupazione derivati e che i programmi di occupazione derivati dal consumo orario di elettricità dell'edificio possono migliorare l'accuratezza della modellazione energetica dell'edificio. Tuttavia, non tutti gli occupanti dell'edificio consumano la stessa quantità di elettricità. Pertanto, l'elettricità dipende dal tipo di occupazione e dal tipo di utilizzo dell'area.	- dati sull'elettricità - programmi di occupazione tramite sensori	- L'MBE orario e il CV (RMSE) per l'energia luminosa sono dello 0,03% e dello 0,07%. - carichi di spina, MBE e CV orari (RMSE) erano rispettivamente dello 0,02% e dello 0,05%.
2017 [11] Edificio residenziale	In questo studio viene analizzato il fabbisogno energetico dell'edificio prima e dopo la ristrutturazione è stato simulato tramite EnergyPlus per diverse zone climatiche. Le analisi di sensibilità hanno confermato che il comportamento degli occupanti ha un impatto significativo sul consumo di energia termica dell'edificio, soprattutto nelle zone a clima caldo e	- dati tramite questionari: presenza/assenza, utilizzo di dispositivi elettrici	Le differenze medie tra la previsione di simulazione del consumo di elettricità e il consumo

ANNO, RIF E DESTINAZIONE D'USO	OBIETTIVI E CONCLUSIONI	DATI IN INPUT	LIVELLO DI ACCURATEZZA (RISULTATI)
	<p>può modificare i carichi di riscaldamento e raffreddamento fino a circa il 90%. I risultati mostrano che l'interazione tra i comportamenti degli occupanti e i materiali dell'involucro è significativa in quanto i comportamenti degli occupanti possono cambiare la strategia di scelta dei tipi di materiale dell'involucro.</p>		<p>reale sono rispettivamente di circa il 25%, 13,5% e 14,5%.</p>
<p>2013 [23] Edificio residenziale</p>	<p>L'obiettivo del modello proposto è quello di generare il profilo della domanda di elettricità di una famiglia residenziale. Viene proposto un modello che è in grado di simulare la domanda di energia di una famiglia composta da più individui, considerando elettrodomestici, HVAC, illuminazione e consumo di energia correlato all'attività. I risultati mostrano modelli di domanda ragionevoli che catturano le variazioni annuali e diurne, le fluttuazioni del carico e la diversità tra configurazione, ubicazione e dimensioni della famiglia. Il modello genera profili di domanda di energia elettrica con le stesse caratteristiche statistiche dei dati misurati residenziali.</p>	<p>catena di Markov eterogenea calibrata con dati reali raccolti dal Bureau of Labor Statistics degli Stati Uniti.</p>	<p>Confronto con i dati misurati: R 2 di 0,5107.</p>
<p>2010 [12] Edificio residenziale</p>	<p>È stato presentato un modello di domanda di elettricità domestica basato sui dati sull'utilizzo del tempo degli occupanti. il modello è stato utilizzato per creare dati sintetici per 22 abitazioni che coprono un anno intero con una risoluzione di 1 minuto. I dati sintetici si confrontano molto</p>	<p>dati su occupazione da interviste</p>	<p>I limiti inferiore e superiore di entrambi i set di dati sono rispettivamente</p>

ANNO, RIF E DESTINAZIONE D'USO	OBIETTIVI E CONCLUSIONI	DATI IN INPUT	LIVELLO DI ACCURATEZZA (RISULTATI)
	bene con i dati misurati e quindi il modello soddisfa gli obiettivi generali fissati per esso.		ente di circa 0,99 e 0,86.

*Tabella 2: Riassunto sulle metodologie e conclusioni degli articoli analizzati*

#### 4.4 Gap di ricerca e obiettivo della tesi

Dall'analisi della letteratura è emerso che non sono stati fatti studi che confrontano l'accuratezza della calibrazione di modelli energetici tra appartamenti sfitti ed appartamenti occupati.

Inoltre, sono emerse delle lacune per quanto riguarda l'aspetto del reperimento dei dati finalizzati alla simulazione energetica degli edifici; infatti, in questo lavoro le informazioni riguardanti l'occupazione (movimenti, accensione/spegnimento impianti, apertura/chiusura finestra e stato dei dispositivi di schermatura) sono raccolte tramite dei sensori direttamente installati all'interno delle stanze, con output ogni cinque minuti; mentre negli articoli analizzati, si è evinto che informazioni così accurate sono utilizzate per la sola calibrazione di edifici pubblici, nonostante l'edilizia residenziale sia al secondo posto (dopo gli edifici pubblici) come caso studio nelle calibrazioni dei modelli energetici. Questa carenza è una problematica sicuramente legata alla privacy, di conseguenza, negli articoli analizzati, le informazioni sull'occupazione vengono reperite tramite questionari o ipotizzate secondo dei profili di comportamento standardizzati.

Alla luce di quanto detto, la seguente tesi ha l'obiettivo di dimostrare l'impatto che ha l'utilizzo delle informazioni sull'occupazione nel processo di calibrazione energetica di un edificio, facendo un confronto tra l'accuratezza di tale processo negli appartamenti sfitti e in quello occupato.

## 5. FASI, MATERIALI E METODI

### 5.1 Fasi

La tesi si articola nelle seguenti fasi operative:

- La prima fase è stata caratterizzata dall'analisi dei risultati prodotti in output dai sensori posizionati all'interno degli appartamenti oggetto di studio
- A seguito di questa analisi, limitatamente all'appartamento occupato, sono state predisposte delle Schedule Comportamentali in cui sono stati inclusi i dati di occupazione relativamente ai movimenti, all'accensione e spegnimento degli impianti, apertura e chiusura finestre e stato dei sistemi di schermatura
- Successivamente è stato modellato l'edificio sul Software Design Builder in termini di involucro esterno ed interno e sotto l'aspetto degli impianti, definendo così diverse zone termiche
- Per quanto riguarda gli appartamenti non occupati, è stata fatta una simulazione definendo il set point di temperatura, creando delle Schedule sulla base dei dati misurati di temperatura, lo stato dei dispositivi di schermatura e lo stato delle finestre
- A seguito di questa prima simulazione sono stati fatti dei confronti tra la temperatura misurata e simulata, sia per gli appartamenti sfitti, che per l'appartamento occupato

- Successivamente è stata eseguita la calibrazione degli appartamenti considerati tramite un Tools sviluppato nel dipartimento dell'Università Politecnica delle Marche
- Infine, per quanto riguarda l'appartamento occupato, è stata rifatta una calibrazione, escludendo dal processo le informazioni derivanti dall'occupazione

## 5.2 Materiali

### 5.2.2 L'edificio caso studio

Il caso studio è situato in Via Maramotti 23, a Reggio Emilia, in un contesto periferico ai margini dell'agglomerato urbano. È esclusivamente a destinazione d'uso di abitazione residenziale tipo E.1, secondo la classificazione degli edifici residenziale in base alla loro destinazione d'uso [24] ed è composto da 10 alloggi di edilizia popolare (categoria A.3 Abitazioni di tipo economico). Il fabbricato, realizzato nel 1984, è caratterizzato da struttura prefabbricata in calcestruzzo armato con pianta rettangolare e si compone di 3 piani fuori terra. Al piano terra sono presenti garage degli alloggi ai piani superiori. La struttura portante del fabbricato è costituita da pannellature prefabbricate in cemento. Gli infissi sono in legno con vetrocamera.

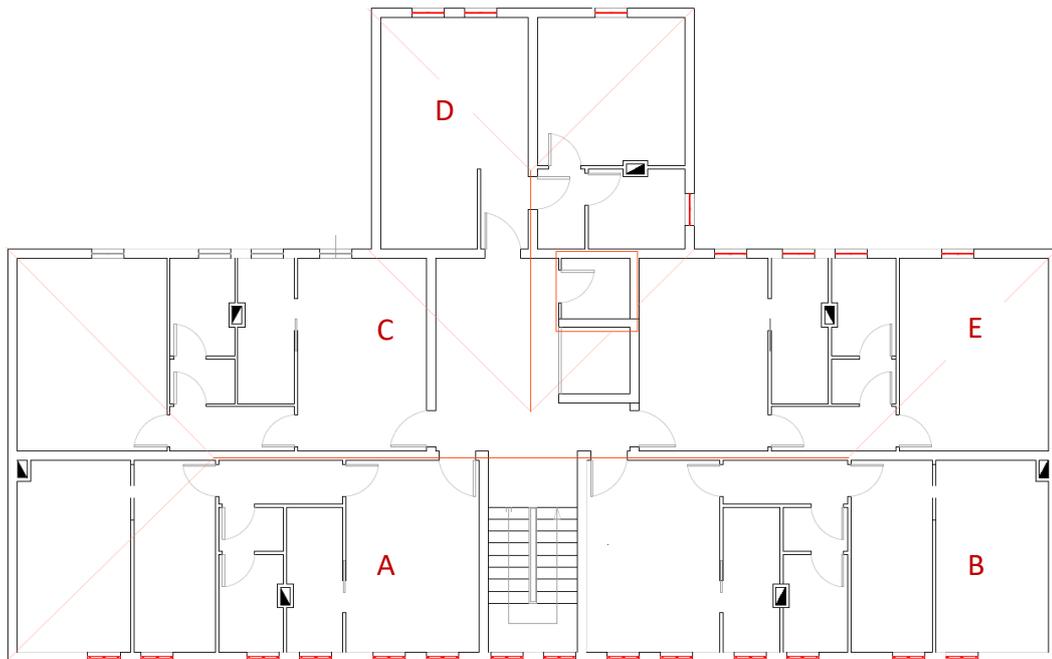


*Immagine 3: Inquadramento territoriale dell'edificio*

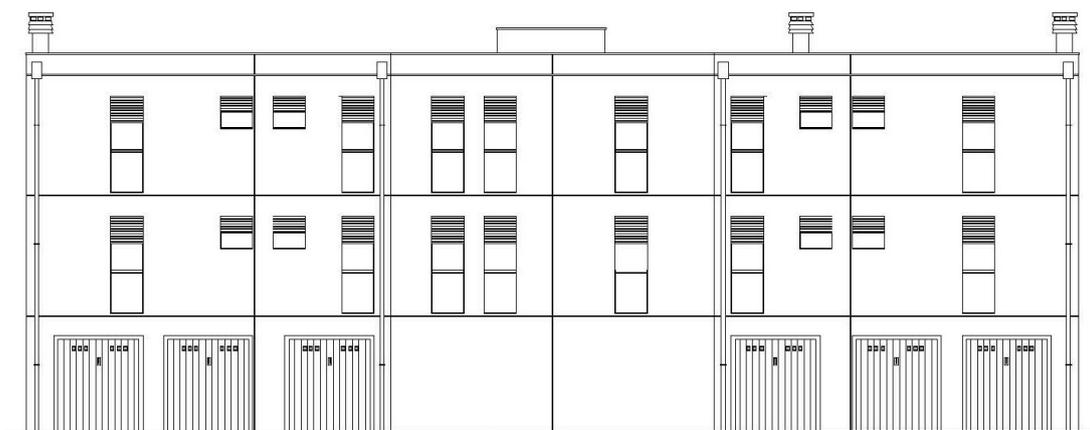


*Immagine 4: Documentazione fotografica*

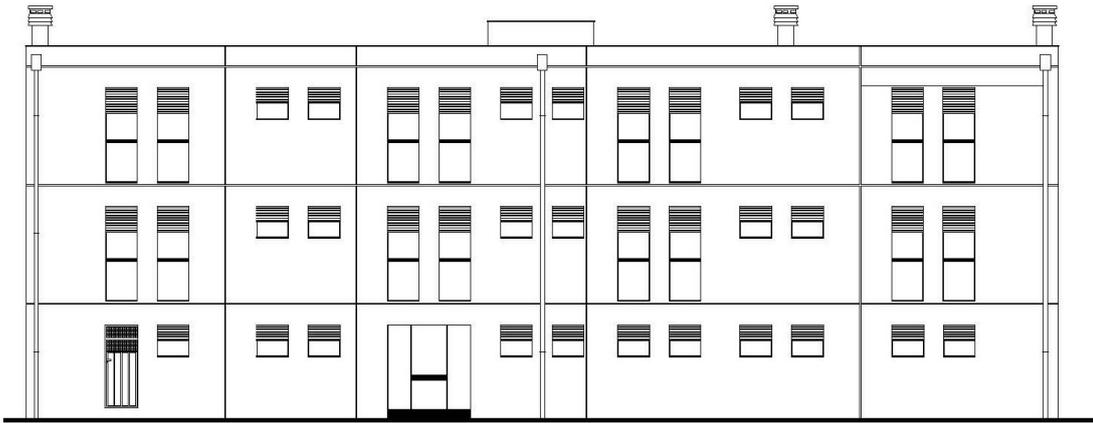
In questo lavoro, viene analizzato il secondo piano fuori terra adibito ad abitazioni. Gli appartamenti considerati sono 5. L'appartamento occupato è denominato "E" e si compone di un soggiorno, una cucina, una camera da letto, un disimpegno ed un bagno. Gli altri appartamenti sono sfitti ed hanno la stessa distribuzione interna delle stanze.



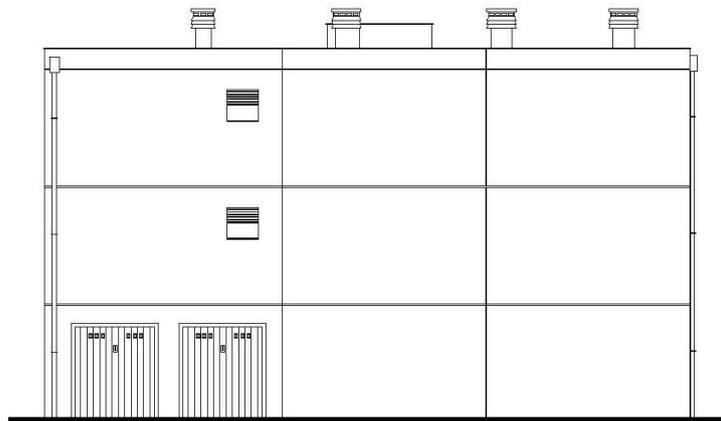
*Immagine 5: Pianta del secondo piano dell'edificio caso studio*



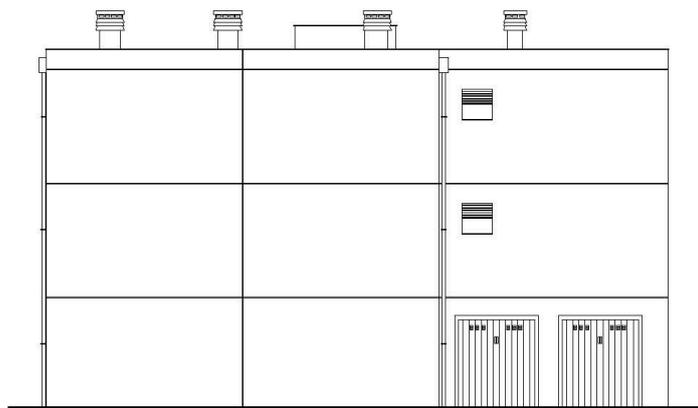
*Immagine 6: Prospetto Ovest dell'edificio caso studio*



*Immagine 7: Prospetto Est dell'edificio caso studio*



*Immagine 8: Prospetto sud dell'edificio caso studio*



*Immagine 9: Prospetto Nord dell'edificio caso studio*

### 5.2.2.1 Descrizione dell'involucro opaco

Le pareti opache che delimitano l'involucro termico sono in calcestruzzo armato di spessore 15 cm con 6 cm di calcestruzzo espanso ed intonaco all'interno (M1 e M2). I muri tra alloggi e il vano scala sono in calcestruzzo armato di spessore 20 cm intonacati (M3). I muri di separazione tra alloggi sono egualmente in calcestruzzo armato di spessore 20 cm intonacati (M4). I muri tra alloggi e l'ascensore sono calcestruzzo armato di spessore 25 cm. Tutti pavimenti degli appartamenti che al primo piano danno sui garage, sono in laterocemento di 15 cm di spessore con un sottofondo di cemento e delle piastrelle (P1 e P2).

#### Riassunto delle strutture opache disperdenti:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m <sup>2</sup> K]	Sup. [m <sup>2</sup> ]
M1	Muro esterno	1,717	455,80
M3	Muro scale	2,663	148,46
M5	Porta di ingresso	1,460	21,00
M6	Cassonetto	3,493	20,02
M7	Muro ascensore	2,611	13,97
P2	Pavimento sopra cantine e garage	1,449	279,35
S2	Soffitto Copertura	0,333	279,35

Tabella 3: Riassunto delle stratigrafie opache presenti nell'edificio cosa studio

Muro esterno, Muro esterno corpo scala					Codice: M1/M2		
N	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e gesso	20,00	0,700	0,029	1400	1,00	11
2	C.l.s. armato (1% acciaio)	150,00	2,300	0,065	2300	1,00	130
3	C.l.s. espanso in fabbrica (pareti est.)	60,00	0,210	0,286	500	1,00	7
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,073	-	-	-

Tabella 4: Definizione stratigrafia e proprietà del muro esterno e del muro esterno del copro scala

Muro scale e muro alloggi vicini					Codice: M3/M4		
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e gesso	10,00	0,700	0,014	1400	1,00	11
2	C.I.s. armato (1% acciaio)	200,00	2,300	0,087	2300	1,00	130
3	Intonaco di calce e gesso	10,00	0,700	0,014	1400	1,00	11
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,130	-	-	-

Tabella 5: Definizione stratigrafia e proprietà del muro del corpo scala

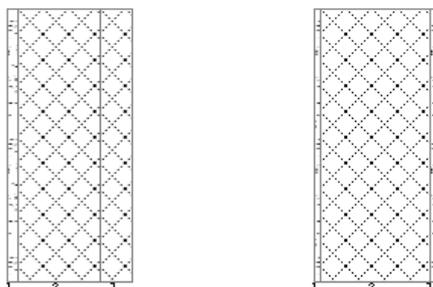


Immagine 10: Stratigrafia M1, M2, Stratigrafia M3/M4

Porta d'ingresso					Codice: M5		
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Legno di abete flusso perpend. alle fibre	15,00	0,120	0,125	450	2,70	643
2	Intercapedine non ventilata $A_v < 500 \text{ mm}^2/\text{m}$	20,00	0,114	0,175	-	-	-
3	Legno di abete flusso perpend. alle fibre	15,00	0,120	0,125	450	2,70	643
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,130	-	-	-

Tabella 6: Definizione stratigrafia e proprietà della porta d'ingresso



Immagine 11: Stratigrafia M5

<b>Cassonetto</b>					<b>Codice: M6</b>		
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Legno di acero flusso perpend. alle fibre	15,00	0,180	0,083	710	2,40	43
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,073	-	-	-

Tabella 7: Definizione stratigrafia e proprietà del cassonetto

<b>Muro Ascensore</b>					<b>Codice: M7</b>		
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
1	C.l.s. armato (1% acciaio)	250,00	2,300	0,109	2300	1,00	130
2	Intonaco di calce e gesso	10,00	0,700	0,014	1400	1,00	11
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,130	-	-	-

Tabella 8: Definizione stratigrafia e proprietà del muro dell'ascensore

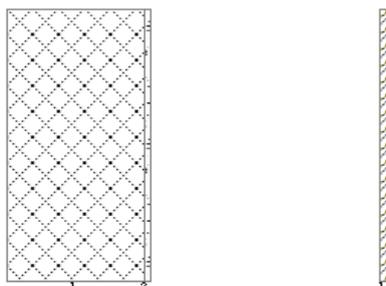


Immagine 12: Stratigrafia M6/M7

<b>Pavimento sopra cantine e garage</b>					<b>Codice: P2</b>		
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	30,00	1,300	0,023	2300	0,84	999
2	Sottofondo di cemento magro	50,00	0,700	0,071	1600	0,88	20
3	Soletta in laterizio spess. 18-20 - Inter. 50	150,00	0,660	0,227	1100	0,84	7
4	Intonaco di calce e gesso	20,00	0,700	0,029	1400	1,00	11
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,170	-	-	-

Tabella 9: Definizione stratigrafia e proprietà del pavimento sopra le cantine e garage

Soffitto copertura					Codice: S2		
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,073	-	-	-
1	Impermeabilizzazione con bitume	2,00	0,170	-	1200	1,00	-
2	C.l.s. armato (1% acciaio)	50,00	2,300	-	2300	1,00	-
3	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,410	-	800	1,00	-
4	Intercapedine debolmente ventilata Av=900 mm <sup>2</sup> /m	130,00	-	-	-	-	-
5	Mattone semipieno	120,00	0,500	-	1167	0,84	9
6	Barriera vapore in bitume feltro /foglio	1,50	0,230	-	1100	1,00	50000
7	Lana di roccia sfusa da insufflaggio	100,00	0,045	-	70	1,03	1
8	Barriera vapore in bitume feltro /foglio	1,50	0,230	-	1100	1,00	50000
9	C.l.s. armato (2% acciaio)	250,00	2,500	-	2400	1,00	130
10	Intonaco di cemento e sabbia	15,00	1,000	-	1800	1,00	10
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

Tabella 10: Definizione stratigrafia e proprietà del solaio di copertura

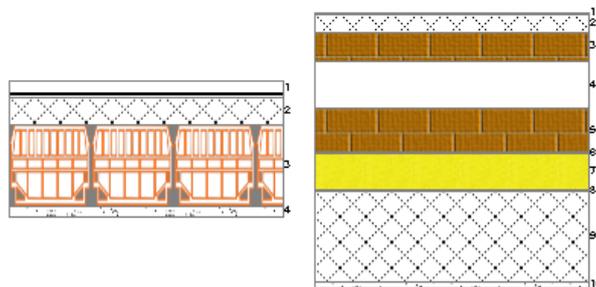


Immagine 13: Stratigrafia P2/S2

Legenda:

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m <sup>3</sup>
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

Tabella 11: Legenda caratteristiche meccaniche e fisiche delle stratigrafie opache

### 5.2.2.2 Descrizione dell'involucro trasparente

I serramenti presenti nell'edificio sono tutti in legno con vetrocamera, avvolgibile in pvc e cassonetto in legno non coibentato.

Riassunto delle strutture trasparenti disperdenti:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m <sup>2</sup> K]	Sup. [m <sup>2</sup> ]
W1	80x80	2,227	11,57
W2	80x250	2,256	60,11

Tabella 12: Riassunto delle stratigrafie trasparenti presenti nell'edificio cosa studio

Definizione stratigrafia del pacchetto vetrato				Codice: W1 W2
N.	Descrizione strato	s	λ	R
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
1	Primo vetro	3,0	1,00	0,003
2	Intercapedine	-	-	0,154
3	Secondo vetro	3,0	1,00	0,003
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,073

Tabella 13: Definizione stratigrafia e proprietà del pacchetto vetrato W1

Legenda:

s	Spessore	Mm
λ	Conduttività termica	W/Mk
R	Resistenza termica	m <sup>2</sup> K/W

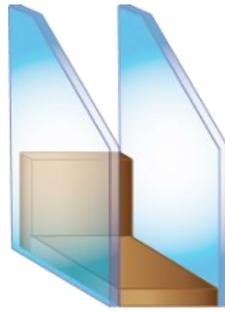


Immagine 14: Stratigrafia vetro W1 W2

### 5.2.2.3 Descrizione degli impianti di raffrescamento

All'interno dell'edificio caso studio sono stati installati degli impianti di climatizzazione per ogni appartamento. Ogni impianto di climatizzazione è collegato a due split che sono rispettivamente posizionati in ogni soggiorno e ogni camera da letto. L'impianto è costituito da un'unità esterna di marca MIDEA, modello: M4OE-28HFN8-Q, collegato a due unità interne modello: M2OG-14HFN8-Q. Le caratteristiche delle unità sono state reperite tramite le schede tecniche [25] dei componenti.

<b>Raffreddamento</b>	Capacità	kW (Nom)	2,70
<b>Riscaldamento</b>	Capacità	kW (Nom)	2,90
<b>Unità Interna</b>	Dimensioni (L-P-A)	mm	570-570-260
	Peso netto	Kg	16,2
	Dimensioni Imballo (L-P-A)	mm	662-662-317
	Peso lordo	Kg	21,4
	Portata Aria (Min-Med-Max)	m <sup>3</sup> /h	416-504-617
	Pressione Sonora (Silent-Min-Med-Max)	dB(A)	33-36-41
	Potenza Sonora (Max)	dB(A)	51

Immagine 15: Stralcio Scheda Tecnica unità interna M2OG-14HFN8-Q

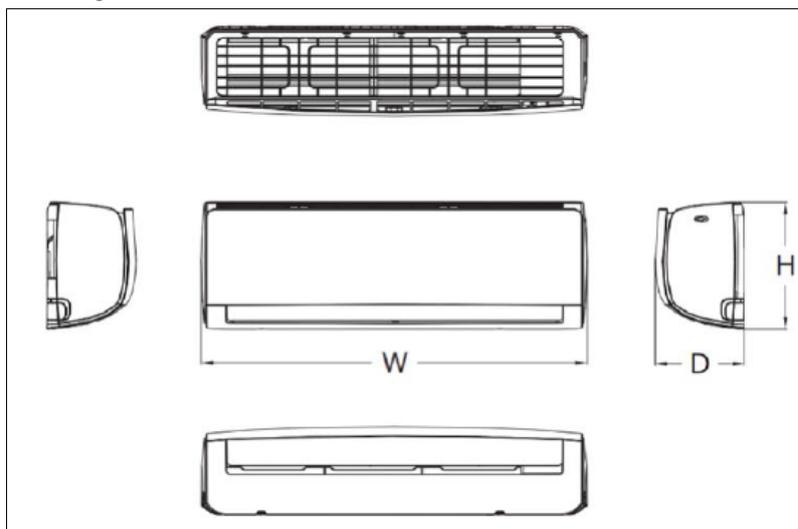


Immagine 16: Schemi dimensionali split esterni

Codice Unità Esterna		M2OG-14HFN8-Q	
EAN		8052705160086	
Combinazione unità interne di riferimento		MSMBAU-09HFN8/Q (x2)	
Alimentazione elettrica		F-V-Hz	
Raffreddamento	Capacità	kW (Min-NomMax)	1,44-4,10-4,79
	Potenza Elettrica Assorbita	W (Min-NomMax)	120-1270-1680
	Corrente	A (Nom)	5,5
	Carico Teorico (PdesignC)	kW	4,1
	SEER		6,8
	Classe di efficienza energetica		A++
	Consumo Energetico Annuo	kWh/A	211
Riscaldamento	Capacità	kW (Min-NomMax)	1,46-6,60-6,86
	Potenza Elettrica Assorbita	W (Min-NomMax)	250-1770-1980
	Corrente	A (Nom)	7,7
	Carico Teorico (PdesignH)	kW (Stagione Media)	3,7
	SCOP	(Stagione Media)	4,0
	Classe di efficienza energetica	(Stagione Media)	A+
	Consumo Energetico Annuo	kWh/A (Stagione Media)	1295
	Temperatura limite esercizio (Tol)	°C	-15
Efficienza energetica	E.E.R./C.O.P.	W/W	3.23/3.73

Immagine 17: Stralcio Scheda Tecnica unità esterna M2OG-14HFN8-Q

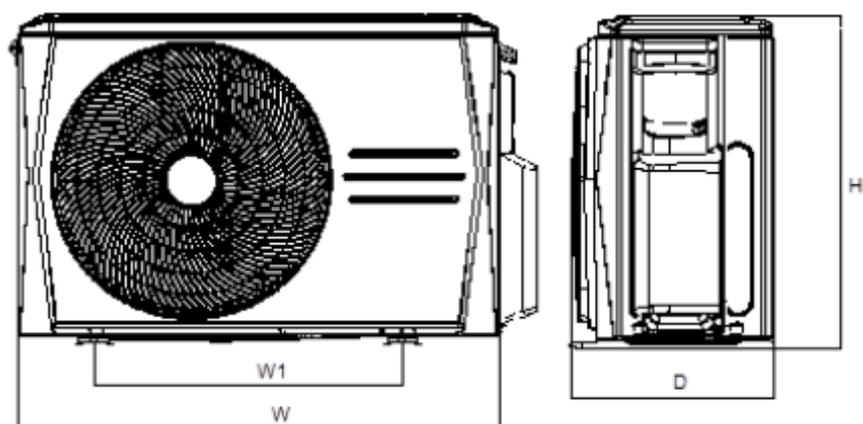


Immagine 18: Schema dimensionale unità esterna

## 5.2.3 Dati climatici

I dati climatici sono stati reperiti dal sito dell'Arpae-SIMC [26] e sono relativi alla stazione metereologica di Correggio (RE), comune che dista circa 10 km da Reggio Emilia. Per quanto Gavassa, comune in cui è ubicato l'edificio caso studio, faccia parte di Reggio Emilia, si è deciso di prendere i dati relativi a Correggio in quanto, non essendo la stazione metereologica posizionata nella zona urbana, si hanno dati più pertinente al tipo di tessuto urbano in cui si trova l'edificio caso studio.

The screenshot displays the 'Arpae DEXT3R' web interface. It features three main selection panels: 'Selezione periodo' (Date selection), 'Selezione variabili' (Variable selection), and 'Selezione stazioni' (Station selection). The 'Selezione periodo' panel includes buttons for 'ULTIMI 2 GIORNI', 'ULTIMA SETTIMANA', 'ULTIMO MESE', and 'ULTIMO ANNO', along with a date range from 'giovedì 2 settembre 2021' to 'giovedì 23 settembre 2021'. The 'Selezione variabili' panel offers 'PER CATEGORIA' and 'LISTA COMPLETA' options. The 'Selezione stazioni' panel lists 'PER BACINO', 'PER PROVINCIA', 'PER RETE', 'SU MAPPA', and 'LISTA COMPLETA'. Below these panels, the 'Variabili selezionate' section shows 'Temperatura dell'aria massima giornaliera a 2 m dal suolo' and the 'Stazioni selezionate' section shows 'Correggio (r)'. A legend on the right indicates file formats: CSV, XLS, and PDF, with an 'ESTRAI I DATI' button. The footer includes 'ultime richieste evasate' with a progress indicator (1, 2, 3) and the text 'Made by DigSIMC@ARPAE using Malmilko, debr, meteozen, arkimet'.

Immagine 19: Sito Arpae-SIMC

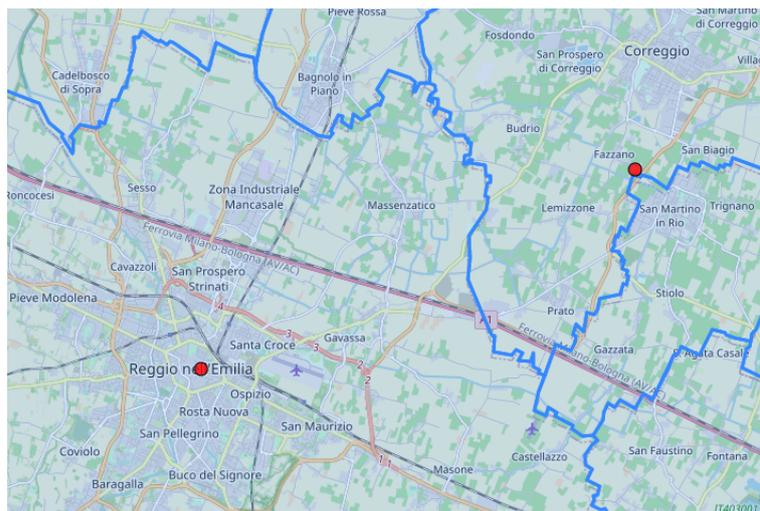


Immagine 20: Localizzazione stazione metereologica di Correggio, presa dal sito dell'Arpae-SIMC

I dati principalmente estratti sono la temperatura esterna dell'aria [°C], umidità relativa [%], la velocità del vento [m/s], la direzione del vento [°] e la radiazione solare [W/mq], rispettivamente dal giorno 1° settembre 2021 al 30 settembre 2021. La temperatura esterna, come anche la radiazione solare, l'umidità, la direzione e la velocità del vento, hanno un intervallo di misurazione ogni mezz'ora.

Di seguito una visione assonometrica dell'edificio caso di studio e del contesto, con diagramma solare relativo al primo giorno preso in considerazione per la simulazione.

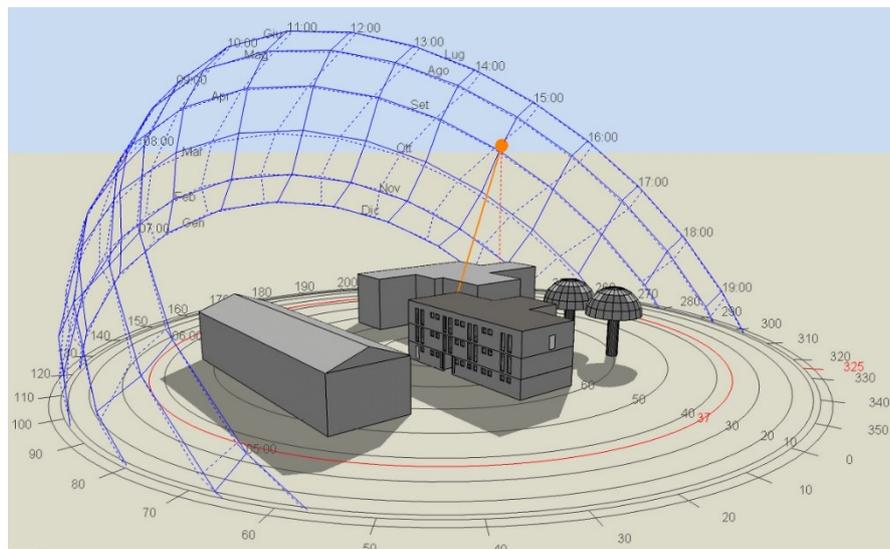


Immagine 21: Assonometria dell'edificio con diagramma solare relativo alla giornata del 02/09/2021

## 5.3 Metodi

### 5.3.1 Monitoraggio sperimentale dell'ambiente interno

Per questo lavoro, è stato preso in considerazione il secondo piano fuori terra dell'edificio sito in Via Maramotti 23, Reggio Emilia.

Il piano considerato è formato da 5 appartamenti, di cui 4 sfitti, mentre un quinto è abitato da 3 persone. Sono state condotte due diverse analisi, in quanto, nell'appartamento occupato, tra i dati considerati nel modello, sono stati compresi gli output dei sensori relativi ai movimenti e quelli relativi all'apertura e alla chiusura delle finestre, utilizzati per creare delle schedule di comportamento.

I dati analizzati sono stati ristretti ad un intervallo di 6 giorni, precisamente dal 2 settembre 2021, al 6 settembre 2021, periodo in cui, negli appartamenti sfitti, sono stati accesi gli impianti di raffrescamento, con un set point di temperatura di 24°.

Per quanto concerne gli appartamenti sfitti, sono stati posizionati dei rilevatori nelle due stanze principali: soggiorno e camera da letto. Ognuno dei sensori, produce ogni 5 secondi un output e rileva la temperatura dell'aria [C°], il quantitativo di anidride carbonica [ppm], la percentuale di umidità relativa nell'aria [%] e la luce [lux].

Per quanto riguarda l'appartamento occupato, sono stati tenuti in considerazione anche gli output relativi ai movimenti e all'apertura e chiusura delle finestre.

In tutti gli appartamenti sono stati presi in considerazione i dati relativi ai consumi, espressi dai sensori "meter" come consumo di energia totale [kWh].

La prima tipologia di sensori, sistemata nel soggiorno e nella camera da letto di ogni appartamento si chiama ERS CO<sub>2</sub>. ERS CO<sub>2</sub> è un sensore per la misurazione dell'ambiente interno. È racchiuso in una scatola sensore ambiente ed è progettato per essere montato a parete. ERS CO<sub>2</sub> è completamente wireless e alimentato da due batterie al litio AA da 3,6 V. All'interno troverai sensori interni per misurare i livelli di CO<sub>2</sub> indoor, la temperatura, l'umidità, la luce e il movimento.

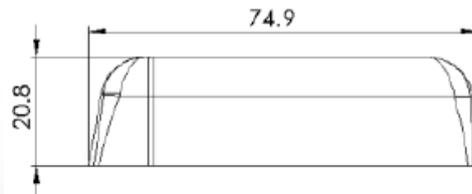


Immagine 22: Sensore ERS CO2.

TIPO DI DATO MISURATO	ACCURATEZZA
Temperatura	$\pm 0.2$ °C
Umidità relativa	$\pm 2$ %
Luce	$\pm 10$ LUX
Movimento	---
Anidride carbonica	$\pm 50$ ppm / $\pm 3\%$

Tabella 14: Accuratezza del sensore ERS CO2.

La seconda tipologia di sensori, applicati alle finestre di ogni soggiorno e camera da letto degli appartamenti presi in considerazione si chiama EMS DOOR. EMS Door è uno dei nostri sensori più sottili. EMS Door può essere utilizzato come sensore di attività di apertura o per il rilevamento del movimento. Le ridotte dimensioni lo rendono ideale per il montaggio su telai di porte, vetri o altre piccole superfici. L'interruttore della porta è costituito da un interruttore reed su un lato del sensore. La distanza massima di rilevamento è di 10 mm.



Dimensions of the EMS Door sensor

Immagine 23: Sensore EMS DOOR.

Si riporta, di seguito, l'elenco degli appartamenti considerati, con i rispettivi sensori e la specifica sulle serrande.

APPARTAMENTO	ORIENTAMENTO	SERRANDE	RILEVATORI	METER
APP D	nord-ovest	Serrande alzate	C6 - C7	Meter 3
APP C	sud-ovest	Serrande abbassate	C4 - C5	Meter 2
APP A	sud	Serrande abbassate	C2 - C3	Meter 1
APP B	sud-est	Serrande alzate	C8 - C9 - C10	Meter 4
APP E	nord	---	C11 - C12	Meter 5

Tabella 15: Riassunto sullo stato degli appartamenti sfitti

LEGENDA SIMBOLI			
	Condizionatore - unità esterna		Presenza stagna 10/16A 2P+PE
	Split - unità interna		Elsys ERS C02 - presenza, umidità relativa, illuminamento, temperatura, CO2
	Contatore di energia ditta SENECA cod. S501-40 o ditta LOVATO ELECTRIC cod. DMED111		Elsys EMS D00R - contatto (finestre)
	Antenna ditta URSALINK - cod. UC1152		Box - centrale raccolta e trasmissione dati ELOG da collegare alla rete elettrica-antenna esterna
	Box - ripetitore con RLOG (con quadro elettrico) da collegare alla rete elettrica		Box - centrale raccolta e trasmissione dati KERLINK con bipresa 10/16A 2P+PE

Tabella 16: Legenda relativa alla disposizione planimetrica dei sensori

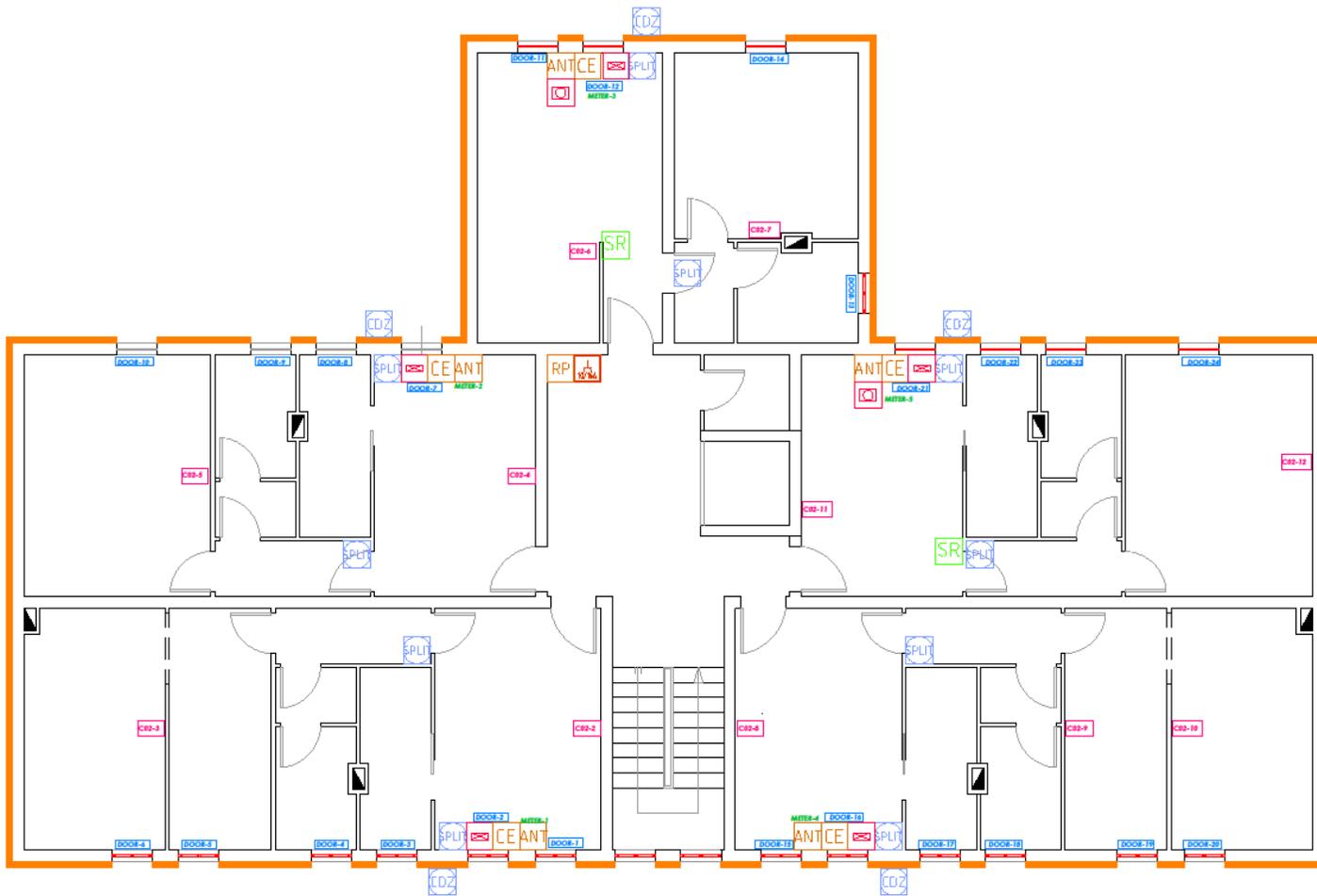


Immagine 24: Pianta del piano secondo con disposizione sensori

### 5.3.2 Modellazione del caso di studio

Il software Design Builder adotta un principio gerarchico per poter impostare il modello definendo prima di tutto le caratteristiche del sito in cui esso è localizzato e successivamente riprodurre il modello 3D dell'edificio con l'utilizzo della suddivisione in blocchi. Ogni blocco è suddiviso in "zone" mediante la definizione di "superfici", ed ogni "zona" è un ambiente con diverse caratteristiche termiche dipendenti dal tipo di "attività", ed è caratterizzata da "superfici" (pavimento, soffitto, partizioni, pareti) tutte con una determinata stratigrafia, ottenuta mediante la definizione di materiali specifici. Ciascuna superficie può essere inoltre caratterizzata da aperture.

Nella seguente tesi, è stato realizzato un modello multi-zona in cui ogni zona termica corrisponde ad una stanza, delimitata da superfici in cui sono state implementate le caratteristiche delle diverse pareti.



*Immagine 25: Gerarchia di selezione dati nel software Design Builder*

In particolare, sono stati definiti:

- sito: consente di assegnare la località scelta per le analisi, i relativi dati climatici e le normative di riferimento; in particolare è stato implementato il file in formato epw che contiene le caratteristiche climatiche del sito in cui è ubicato l'edificio;
- edificio: riassume tutte le caratteristiche del modello e consente di gestire a livello globale le soluzioni o scelte adottate; di conseguenza, utilizzando questo livello, vengono settate le stesse soluzioni per l'intero edificio;
- blocco: ogni edificio è composto da uno o più blocchi, ad esempio i diversi piani; lavorando a questo livello, vengono settati i parametri relativi al singolo blocco. I blocchi si dividono per tipologia in "blocchi edificio", "blocco di outline" e "blocco componente".

- zona: è ciò che caratterizza il comportamento termico dell'edificio in quanto vengono assegnate a questo livello le condizioni termiche interne; è possibile avere diverse zone termiche all'interno dello stesso edificio. Nel caso considerato, le zone termiche sono in totale 26 e rappresentano le varie stanze; si è scelto di fare una modellazione dettagliata finalizzata alla calibrazione del modello, utilizzando il dato "temperatura interna dell'aria", disponibile nei soggiorni e nelle camere da letto degli appartamenti analizzati;
- superficie: riassume i settaggi delle singole superfici componenti l'intero edificio, divise per esposizione e tipologia di chiusura (muri perimetrali, solaio contro terra, solaio di copertura, partizioni interne); a questo livello è stato possibile specificare le caratteristiche di ogni singolo elemento costruttivo, coerentemente con quanto detto nel paragrafo 5.2.2.1 e 5.2.2.2. In particolare, sono stati definiti i materiali in termini di Spessore, conduttività termica, Resistenza termica e fattore di resistenza alla diffusione del vapore.
- aperture: a questo livello vengono individuate le singole aperture in ciascuna chiusura perimetrale e consente di specificarne le caratteristiche.

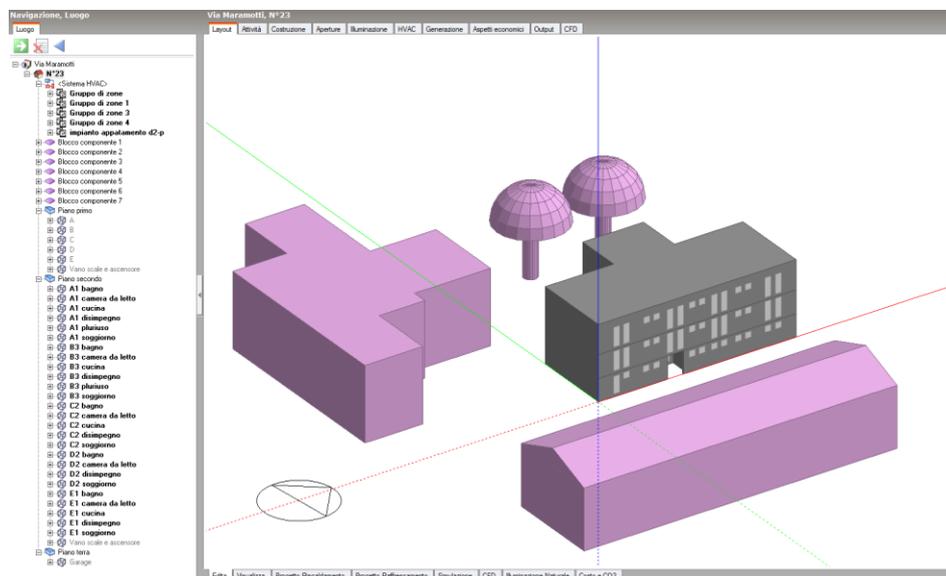


Immagine 26: Schermata iniziale edificio caso studio Design Builder

### 5.3.2.1 Definizione del file climatico

Essendo Design Builder un programma di simulazione energetica dinamica, utilizza i dati climatici in un particolare formato epw. Attraverso il pannello “Posizione” viene definita la localizzazione. È stato impostato il template (modello) della località, contenente le coordinate geografiche, i dati climatici per la progettazione del riscaldamento e del raffrescamento, il file climatico orario ed infine alcuni dettagli geomorfologici del luogo, come la quota sul livello del mare, l’esposizione al vento, le caratteristiche del terreno e le relative temperature mensili e le precipitazioni. Il file climatico così definito è stato utilizzato nel software Design Builder per le simulazioni energetiche.

via maramotti, inserito temp, wind, wind direction e global solar.epw - Elements

File Edit Tools View Window Help

Site Name: Via Maramotti 23  
 Latitude [degrees]: 44.7 Longitude [degrees]: 10.69  
 Time Zone: 1 Elevation [m]: 58

Tools:     Variables to Hold Constant:

Date/Time	Dry Bulb Temperature [C]	Wet Bulb Temperature [C]	Atmospheric Pressure [kPa]	Relative Humidity %	Dew Point Temperature [C]	Global Solar [Wh/m2]	Normal Solar [Wh/m2]	Diffuse Solar [Wh/m2]	Wind Speed [m/s]
2021/09/01 @ 00:00:00	16.6	14.7	100.79	82	13.55	0	0	0	0
2021/09/01 @ 01:00:00	16.4	14.84	100.77	85	13.9	0	0	0	0.9
2021/09/01 @ 02:00:00	15.9	14.46	100.75	86	13.59	0	0	0	0.2
2021/09/01 @ 03:00:00	15.5	14.29	100.73	88	13.55	0	0	0	0
2021/09/01 @ 04:00:00	14.6	13.62	100.71	90	13.01	0	0	0	0
2021/09/01 @ 05:00:00	14.1	13.23	100.69	91	12.69	1	0	1	0.2
2021/09/01 @ 06:00:00	14.5	13.62	100.67	91	13.08	8	0	8	0
2021/09/01 @ 07:00:00	16.3	14.85	100.65	86	13.98	83.25	192	22	0.5
2021/09/01 @ 08:00:00	21.6	17.88	100.63	70	15.92	257.19	455	37	0
2021/09/01 @ 09:00:00	23.9	18.8	100.61	62	16.21	425.11	437	153	0
2021/09/01 @ 10:00:00	26.2	19.36	100.59	53	15.9	589.91	365	325	0.5
2021/09/01 @ 11:00:00	28.8	20.26	100.57	46	16.06	707.15	453	351	0.2
2021/09/01 @ 12:00:00	28.3	19.67	100.55	45	15.27	775.67	606	291	0.7
2021/09/01 @ 13:00:00	28.2	19.22	100.54	43	14.47	801.16	571	364	1.3
2021/09/01 @ 14:00:00	29.1	19.15	100.54	39	13.77	760.58	772	231	0.9
2021/09/01 @ 15:00:00	29.9	19.35	100.54	37	13.67	672.36	767	238	0.7
2021/09/01 @ 16:00:00	29.7	18.58	100.53	34	12.21	539.22	1018	117	1.1
2021/09/01 @ 17:00:00	29.2	18.82	100.53	37	13.06	370.83	1361	42	1.1
2021/09/01 @ 18:00:00	28	18.69	100.52	41	13.56	106.22	1367	26	0.9
2021/09/01 @ 19:00:00	25.7	18.11	100.52	48	13.91	0	0	0	0

Immagine 27: Schermata Elements con File climatico 2021 – Correggio

### 5.3.2.2 Definizione dell'involucro dell'edificio

In Design Builder è possibile definire il modello considerando le caratteristiche costruttive dell'edificio, definendo i materiali delle varie stratigrafie presenti all'interno del modello energetico. Le principali caratteristiche presenti nell'involucro del caso studio vengono implementate in DB definendo i materiali che compongono i singoli strati delle soluzioni costruttive. Sono stati definiti due diversi pacchetti costruttivi rispettivamente per i solai d'interpiano e il solaio di copertura.

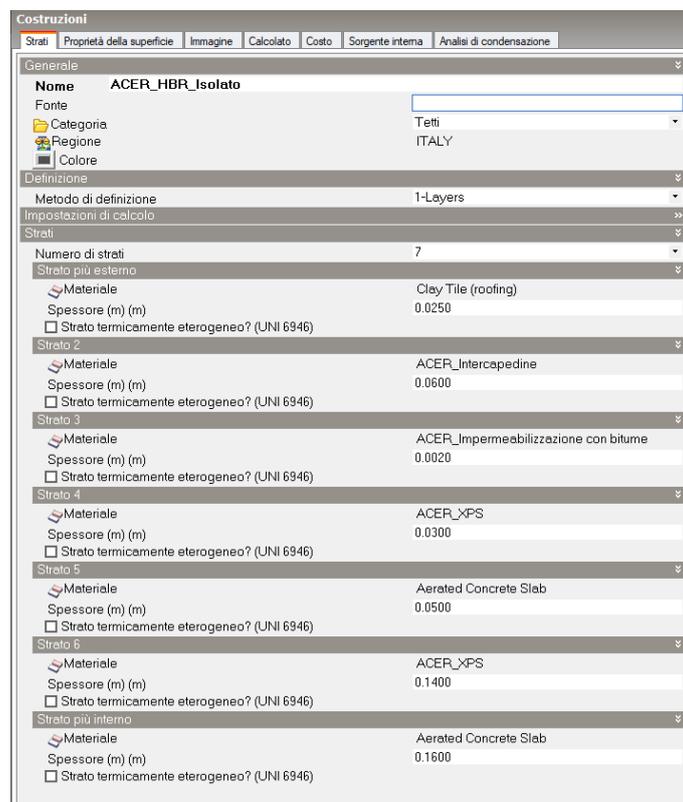


Immagine 28: Definizione stratigrafia solaio di copertura su Design Builder

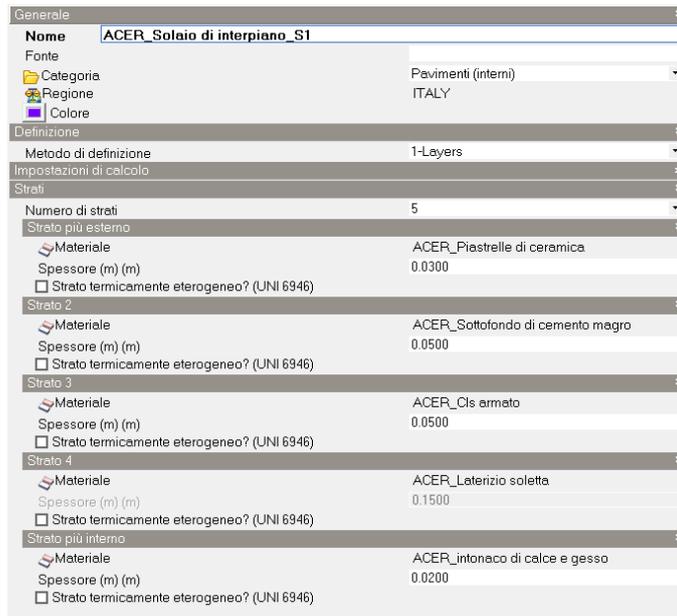


Immagine 29: Definizione stratigrafia solaio di interpiano su Design Builder

Inoltre, sono state definite due diverse stratigrafie per quanto riguarda i muri perimetrali e le pareti divisorie interne agli appartamenti. Definendo sia le pareti perimetrali, che le pareti divisorie interne il software Design builder considera ogni stanza come una zona termica interna.

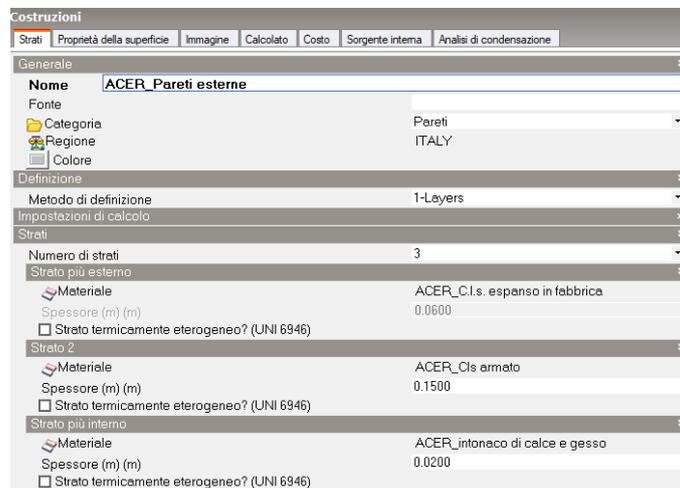


Immagine 30: Definizione stratigrafia Muratura perimetrale su Design Builder

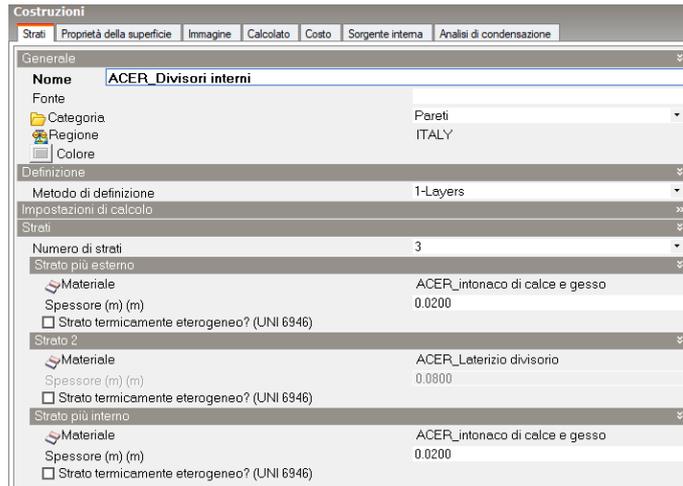


Immagine 31: Definizione Stratigrafia Pareti divisorie interne su Design Builder

Per differenziare il ricambio d'aria interno agli appartamenti, tramite le porte che dividono le diverse zone termiche, e lo scambio termico tra l'interno degli appartamenti e il corpo scala condominiale, sono state impostate le porte interne agli appartamenti come sempre aperte al 100%, mentre le porte d'ingresso come sempre chiuse.

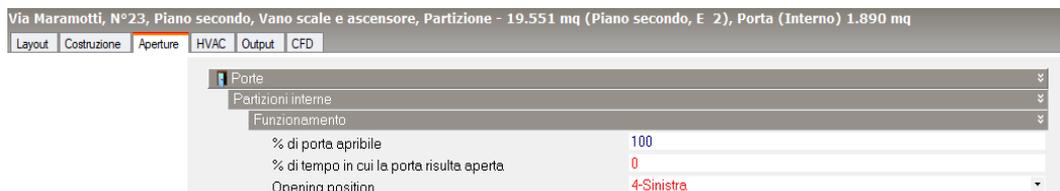


Immagine 32: Design Builder, definizione del funzionamento delle porte

Per quanto riguarda la definizione dei dispositivi schermanti, è stato scelto, su Design Builder, un modello di persiane standard.

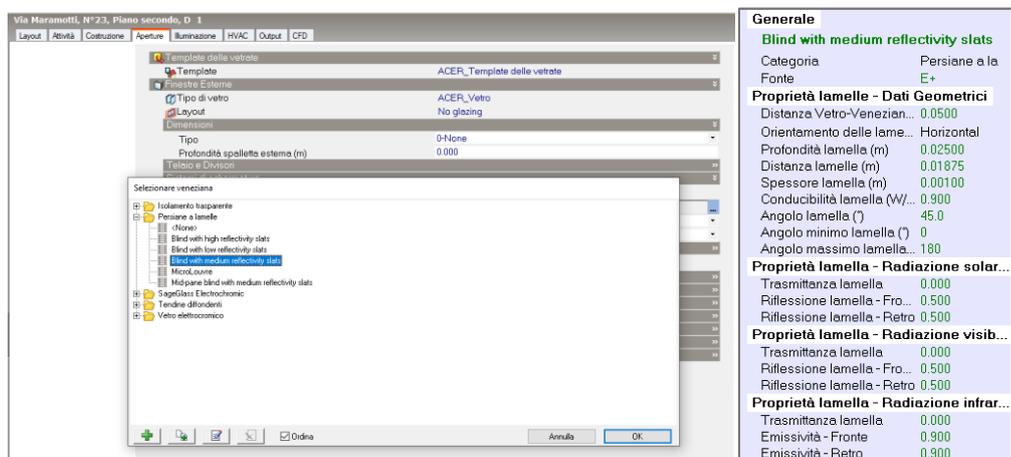


Immagine 33: definizione sul modello Design Builder dei dispositivi schermanti dell'appartamento D2-P

In totale, sono state definite 26 zone climatiche che rappresentano le diverse stanze degli appartamenti presi in considerazione e il vano scale.

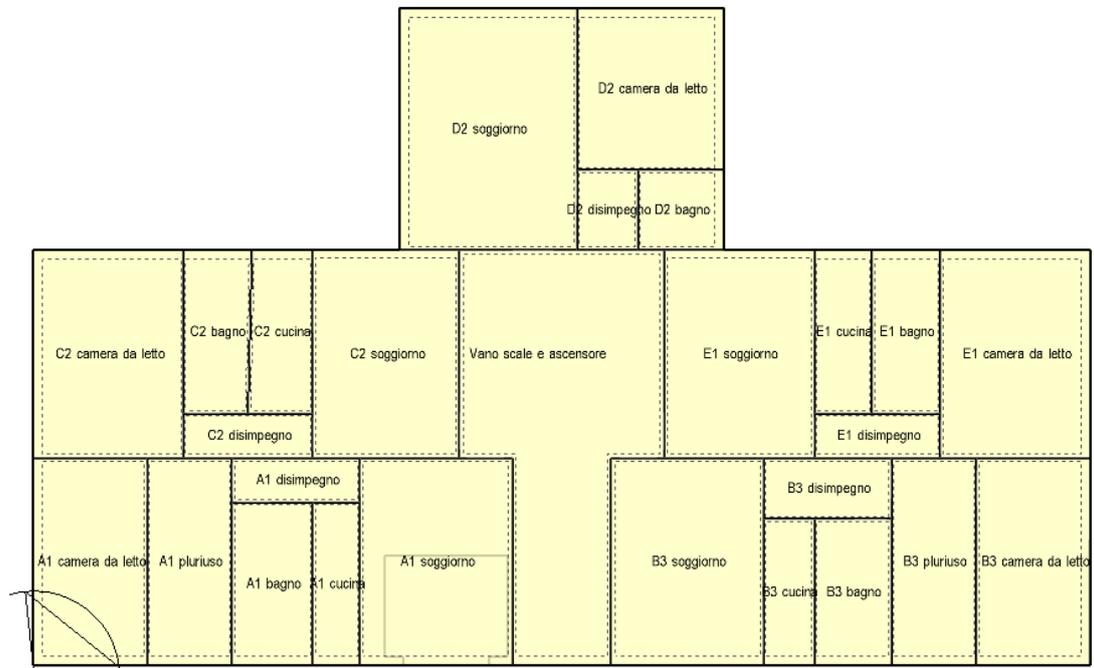


Immagine 34: Schermata Design Builder, divisione delle zone climatiche

### 5.3.2.3 Definizione dell'impianto di raffrescamento

Per la definizione dell'impianto, il software Design Builder può essere impostato su Semplice o Compact. Quando impostato su semplice, Design Builder effettua il dimensionamento degli impianti in maniera semplificata. Nel caso compact Energyplus si occupa completamente del calcolo dettagliato degli impianti.

Per questo lavoro gli impianti di raffrescamento sono stati definiti in maniera dettagliata, per ogni zona climatizzata.



Immagine 35: Design Builder, definizione del sistema HVAC

È stato definito un gruppo di zone per ciascun appartamento, che ha lo scopo di collegare i due split, rispettivamente posizionati nei soggiorni e nelle camere da letto.

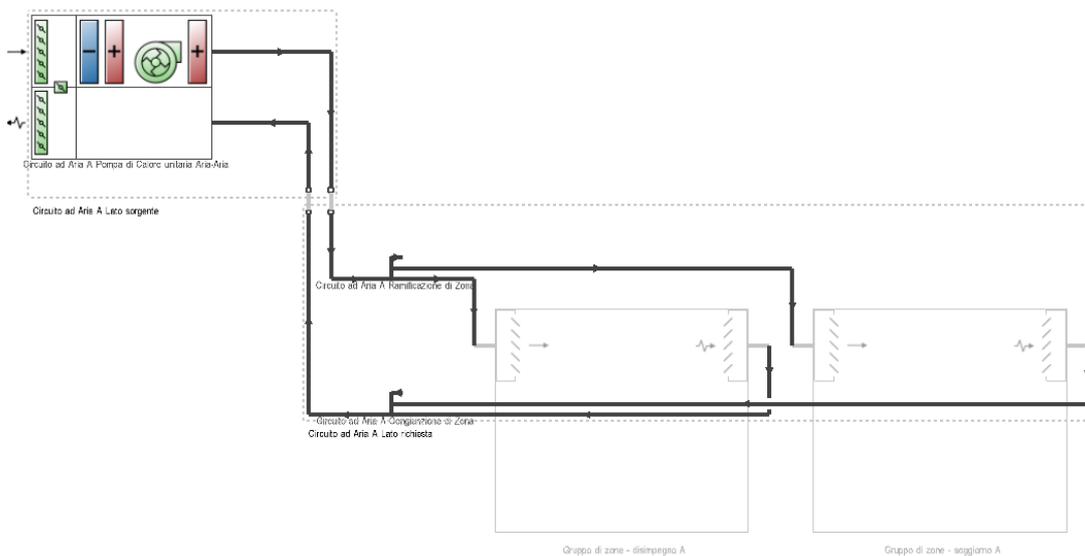


Immagine 36: Design Builder, definizione dell'impianto interno ad ogni appartamento

Per ottenere una simulazione realistica dei consumi energetici di ogni singolo appartamento, sono stati definiti dei sotto circuiti di generazione dell'aria costituiti da un'unità di trattamento aria e da un set point manager. Dal momento che, si è ipotizzato che entrambi gli split, rispettivamente posizionati nei soggiorni e nelle camere da letto, si accendano nello stesso momento, è stata considerata la

temperatura di una sola stanza come set point di accensione. Al circuito lato “richiesta” è collegato il sotto circuito di distribuzione dell’aria che comprende i collegamenti con le aree servite dal circuito ad aria.

#### 5.3.2.4 Definizione del contesto

Per rappresentare la presenza di altri edifici ed altri ingombri, in adiacenza dell’edificio caso studio è stato utilizzato lo strumento Blocco componente: sono blocchi geometrici che non contengono zone termiche ma sono utilizzati per rappresentare oggetti che generano ombre, riflessioni solari o masse contestuali che rappresentano delle ostruzioni per l’edificio. I tipi di blocco componenti sono distinguibili ulteriormente in:

- Standard: elementi che generano ombreggiamenti o riflessioni durante la simulazione. Vengono utilizzati per modellare ostruzioni come altri edifici, alberi, schermature e aggetti. Sono indicati nello spazio modello con una colorazione violacea.
- Adiabatico: blocchi che rappresentano volumi in adiacenza all’edificio o che fanno parte di esso, ma tra i quali il trasferimento di calore è trascurabile. Sono indicati nello spazio modello in rosso.
- Terreno: blocchi che rappresentano l’ingombro dell’adiacenza tra il terreno e l’edificio. Sono indicati nello spazio modello in verde.

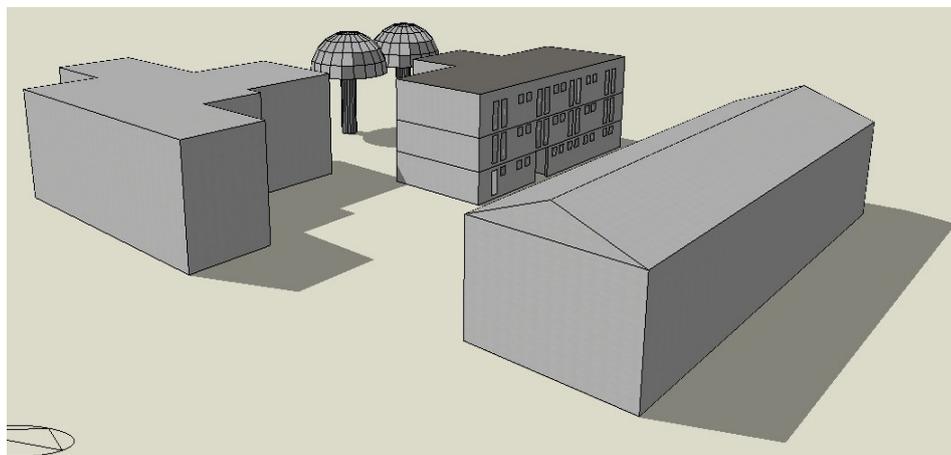


Immagine 37: Schermata del contesto dell’edificio caso studio Design Builder

### 5.3.3 Calibrazione del caso di studio

Per calibrare il modello fino ad ora descritto, è stato utilizzato un Tools, sviluppato all'interno del dipartimento dell'Università Politecnica delle Marche. Questo strumento software facilita l'applicazione della calibrazione automatizzata.

Questo strumento integra conoscenze specialistiche, analisi della sensibilità e algoritmi di ottimizzazione dell'Intelligenza Artificiale (AI) all'interno dello stesso flusso di lavoro software, riducendo al minimo il numero di input richiesti dai professionisti nei processi di calibrazione BEM.



Il processo di ottimizzazione, intrinseco nel software appena descritto, sfrutta l'utilizzo di algoritmi genetici che sono una tecnica metaeuristica naturale che si basa sull'analogia con i meccanismi di selezione naturale in campo genetico. L'idea di base è quella di considerare una "popolazione" di soluzioni che evolve in accordo con un meccanismo di selezione in modo da produrre soluzioni con buoni valori della funzione obiettivo.

L'evoluzione di una popolazione è legata al processo di riproduzione. Durante la loro vita gli individui (genitori) si accoppiano producendo nuovi individui (figli) il cui patrimonio genetico è una combinazione di quello dei genitori. I figli subiscono mutazioni rispetto al patrimonio genetico ereditato dai genitori per effetto della vita di relazione e delle influenze dell'ambiente. La legge di selezione naturale si basa sul principio che, tra gli individui generati, hanno maggiori probabilità di sopravvivere quelli che possiedono una fitness migliore.

Allo stesso modo, all'interno del software, tramite questo processo, sono selezionati i parametri che hanno maggiore influenza per la calibrazione del modello energetico.

Una volta caricate nel Tools le informazioni richieste quali:

- Il file climatico utilizzato per la simulazione in Design Builder
- Il file IDF estratto da Design Builder

Il primo passo per avviare la calibrazione tramite questo tools è la creazione del file config.json; all'interno di questo vengono definite:

- il file climatico
- Il file IDF, sintetizzato grazie al programma Energy Plus
- il valore CoP iniziale e il suo range di variazione;
- il nome, la frequenza e la chiave della variabile di uscita (es. nome della zona termica) per la quale devono essere calcolati gli effetti elementari di sensibilità del metodo Morris;
- il numero massimo di generazioni da creare nel processo di ottimizzazione seguono tre fasi principali della procedura automatica:
- La preselezione dei parametri che può definire quali sono gli input del modello più importanti da considerare per la calibrazione, consentendo di ridurre la portata di ricerca dei parametri e velocizzando il processo automatico;

```
{
  "epversion": "9-4-0",
  "epw_file": "/home/utente_tesi2/Tool_4/noemi_test/via maramotti-UFFICIALE.epw",
  "idf_file": "/home/utente_tesi2/Tool_4/noemi_test/idf new ultimo.idf",
  "N": 5,
  "initial_CoP": 1,
  "CoPbounds": [0.8, 1.2],
  "relative": 0.2,
  "change_setpoint": false,
  "file": "/home/utente_tesi2/Tool_4/noemi_test/setpoint.csv",
  "variable_name": "Electricity:Facility",
  "variable_key": null,
  "variable_frequency": "Timestep",
  "threshold": 0.99,
  "best_candidate": null,
  "max_generations": 30
}
```

Immagine 39: Schermata del file config.json all'interno del Tools

Una seconda fase che, grazie al metodo di Morris per determinare: o quali parametri, tra quelli individuati nella fase precedente, influenzano maggiormente la previsione

del modello e per i quali potrebbe essere necessaria una stima più accurata; o quali parametri non sono influenti e possono essere scartati dalla fase successiva;

Una fase di ottimizzazione che implementa algoritmi di ottimizzazione dell'IA per determinare in modo efficiente i valori di input del modello che forniscono il miglior adattamento tra misurazioni sperimentali e previste.

Al termine del processo automatizzato, il modellatore energetico dell'edificio confronta la bontà di adattamento ottenuta dal modello ottimizzato (il valore CV(RMSE) con le soglie definite dalle Norme per determinare se il modello può essere considerato calibrato o meno.

Per quanto riguarda il parametro temperatura, sono stati presi in considerazione per i confronti tra modello simulato e modello calibrato, i dati sub orari, poiché, grazie alla creazione di Schedule sia per gli appartamenti sfitti che per quello occupato, risultavano coerenti con i dati misurati.

Per quanto riguarda i consumi, sono stati confrontati dati giornalieri, poiché, essendo il valore di CV (RMSE) rapportato alla media dei dati totali ed essendo l'accensione dell'impianto non continua, questo portava ad un abbassamento del denominatore e quindi, il valore percentuale risultava molto elevato e non allineato con la restituzione grafica dei dati.

## 6. RISULTATI

### 6.1 Monitoraggio sperimentale dell'ambiente interno

#### 6.1.1 Appartamenti non occupati

Per ogni appartamento sfitto, sono stati analizzati i dati relativi alla temperatura interna, espressi dai sensori interni e confrontati con i valori di temperatura esterna, e con i dati relativi ai consumi, in termini di consumo di energia totale, sapendo che il set point di temperatura era impostato a 24°. È stata, inoltre, verificata l'attendibilità dati relativi all'illuminazione degli appartamenti con le serrande alzate, confrontandoli con i dati ambientali outdoor, di irradianza globale visibile media oraria, espressa in W/mq.

Di seguito si riporta un esempio dell'analisi condotta; in particolare è stata analizzato l'andamento della temperatura interna all'interno dell'appartamento D2-P, il giorno 2 settembre 2021. Dall'andamento delle curve (Immagine 40) e dalla distribuzione degli incrementi di energia consumata (Immagine 41), si deduce l'accensione degli impianti, in corrispondenza degli innalzamenti di temperatura, dati dall'aumento della temperatura esterna e dalla radiazione solare entrante dalle serrande alzate.

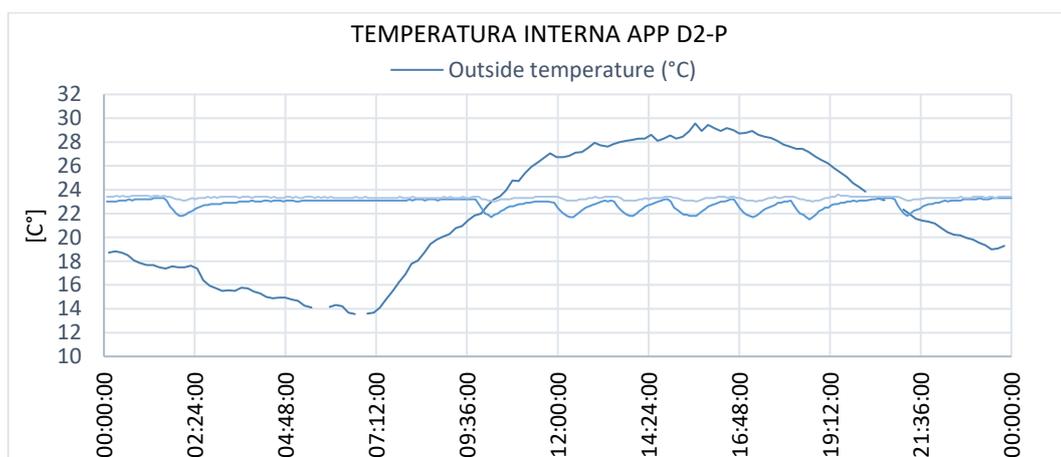
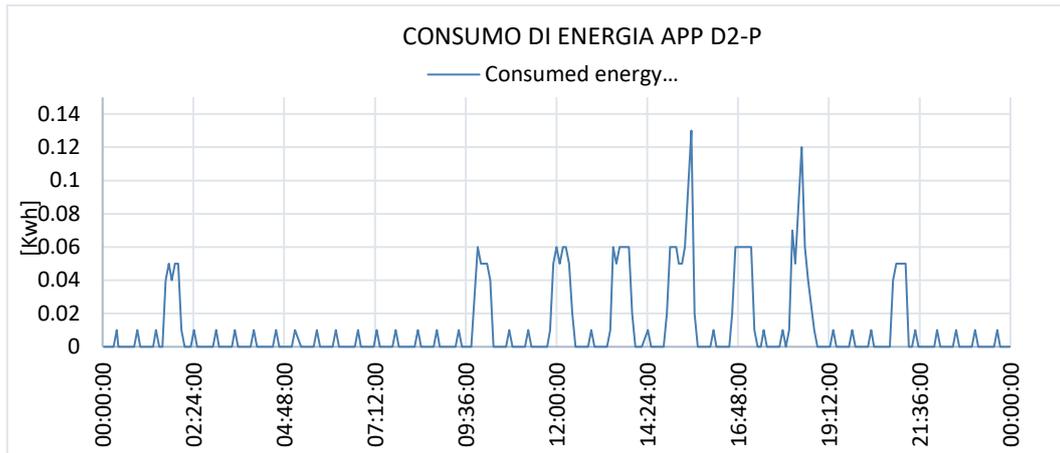


Immagine 40: all'andamento della temperatura rilevato dai sensori co2-6 e co2-7 relativi alla giornata del 02/09/2021



*Immagine 41: andamento dei consumi di energia relativi alla giornata del 02/09/2021*

La stessa analisi è stata condotta per ogni stanza, in cui sono presenti sensori, per ogni appartamento sfritto, estesa a tutta la durata del periodo preso in considerazione.

### 6.1.2 Appartamento occupato

Per quanto riguarda l'analisi dei dati relativi all'appartamento occupato, sono state fatte osservazioni più complesse. In particolare, sono stati presi in considerazione più fattori quali, temperatura interna, percentuale di anidride carbonica, apertura e chiusura delle finestre, illuminazione e movimenti legati all'occupazione.

Nell'appartamento occupato, sono considerati nell'analisi dei dati i due sensori di movimento c-11 e c-12 che sono posizionati rispettivamente nel soggiorno e nella camera da letto.

I dati di occupazione in output provenienti da questi hanno un range di valore, per entrambe le stanze e per i giorni considerati, che va da 0 a 10. Anche in questo caso sono state adottate delle semplificazioni, i dati sono stati approssimati in fasce temporali di 30 minuti, per rendere più agevole il caricamento di questi nel modello, e per verificare la veridicità di tali valori, sono stati confrontati con i dati, in un primo momento, con la concentrazione di anidride carbonica esterna, e poi considerando che all'aumentare dei movimenti e, quindi dell'occupazione della determinata stanza, corrisponde anche un aumento di anidride carbonica.

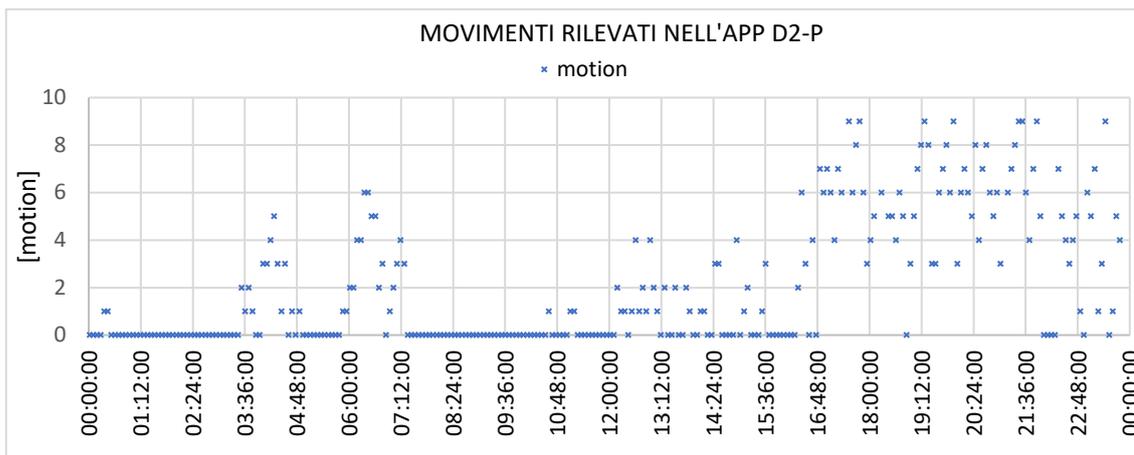


Immagine 42: occupazione del soggiorno nella giornata del 06/09/2021

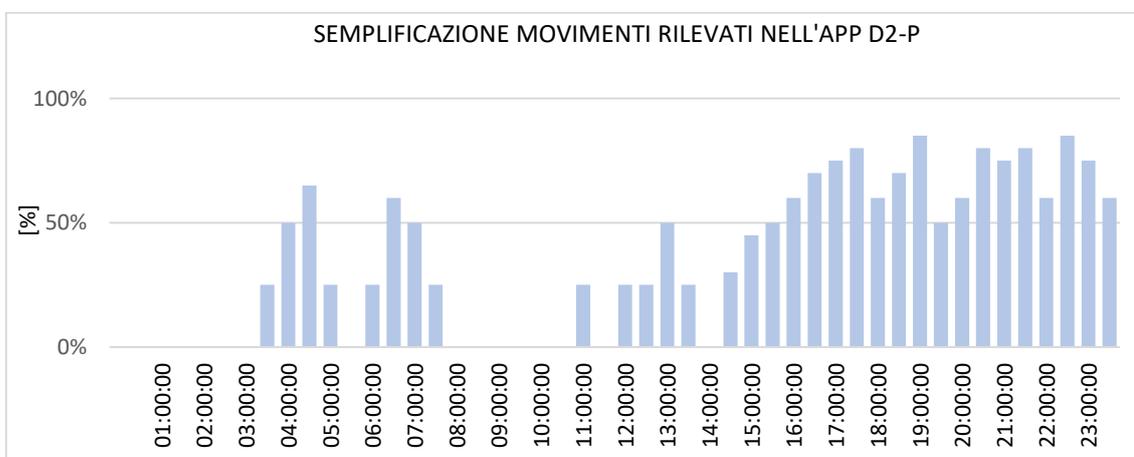


Immagine 43: occupazione del soggiorno nella giornata del 06/09/2021

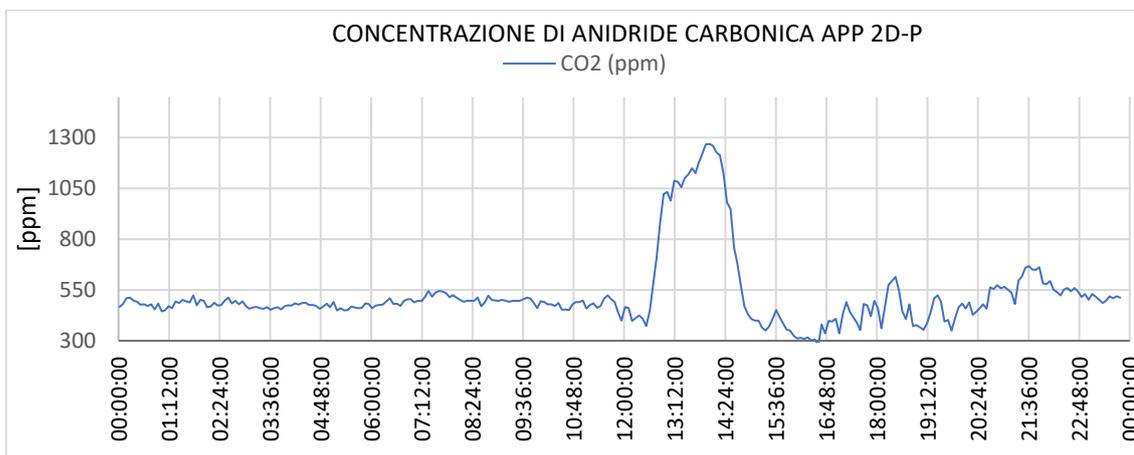


Immagine 44: concentrazione di anidride carbonica del soggiorno nella giornata del 06/09/2021

Per quanto riguarda l'apertura e la chiusura delle finestre e dei dispositivi di schermatura (serrande), in un primo momento si è pensato di valutare gli output dei sensori door-21 e door-24 posizionati rispettivamente nella finestra del soggiorno e in quella della camera da letto.

Questi valori sono stati considerati da subito non del tutto precisi; dunque, si è deciso di valutare questo fattore secondo un ragionamento diverso.

Si è ipotizzato di considerare valido il dato “finestra aperta” quando si sono registrate diminuzioni di concentrazione di anidride carbonica considerevoli (come mostra il grafico 2) e variazioni di temperatura (Grafico 6) non direttamente collegate all'accensione dell'impianto. Quest'ultima considerazione è stata possibile utilizzando i dati relativi alle variazioni di consumo di energia, ottenuti facendo la differenza tra due valori di consumi energetici totali consecutivi.

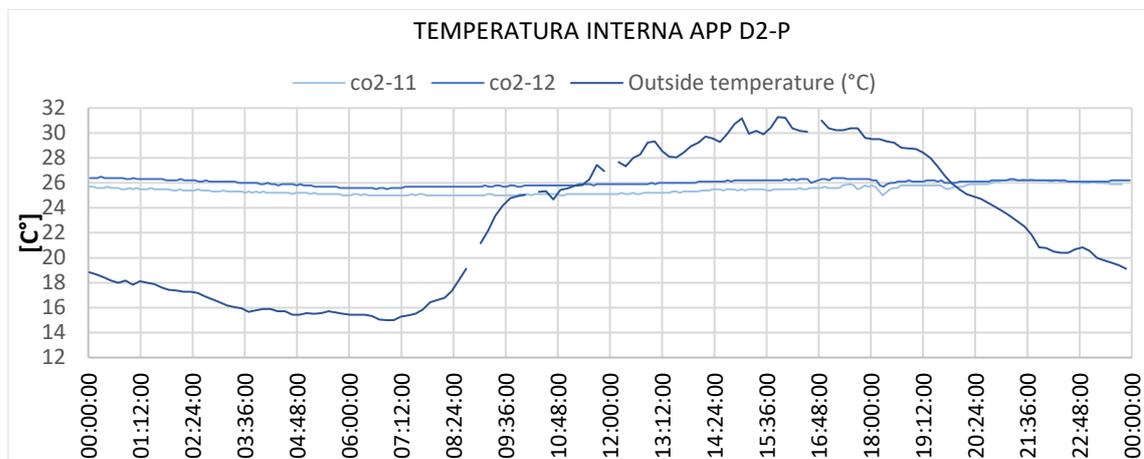


Immagine 45: temperatura interna del soggiorno nella giornata del 06/09/2021

Per la giornata del 06/09/21, analizzando gli andamenti di temperatura interna, le variazioni di concentrazione di anidride carbonica, l'influenza dell'occupazione, i cui sensori sono ritenuti più affidabili rispetto ai door, si deduce che la finestra nel soggiorno sia stata tenuta sempre chiusa.

Inoltre, per valutare lo stato dei dispositivi di schermatura, sono stati considerati i valori di illuminazione durante la giornata. In particolare, sono stati confrontati i valori della luce espressi dai sensori interni alle stanze, con i valori di irradianza globale visibile media oraria: ogni qualvolta i sensori rilevano un valore pari allo 0, mentre dalla stazione esterna all'edificio sono indicati valori maggiori, si è stabilito che le serrande fossero abbassate. I dati in output dei sensori sono caratterizzati da range di valori che vanno da 0 a 40 lux, ogni 5 secondi; per inserire i dati nel modello energetico, è stata fatta una semplificazione, stimando i valori da 0 a 100% e facendo

delle medie ogni 30 minuti. Il valore 0% corrisponde alla serranda completamente abbassata, mentre il valore 100% rappresenta il dispositivo di schermatura alzato.

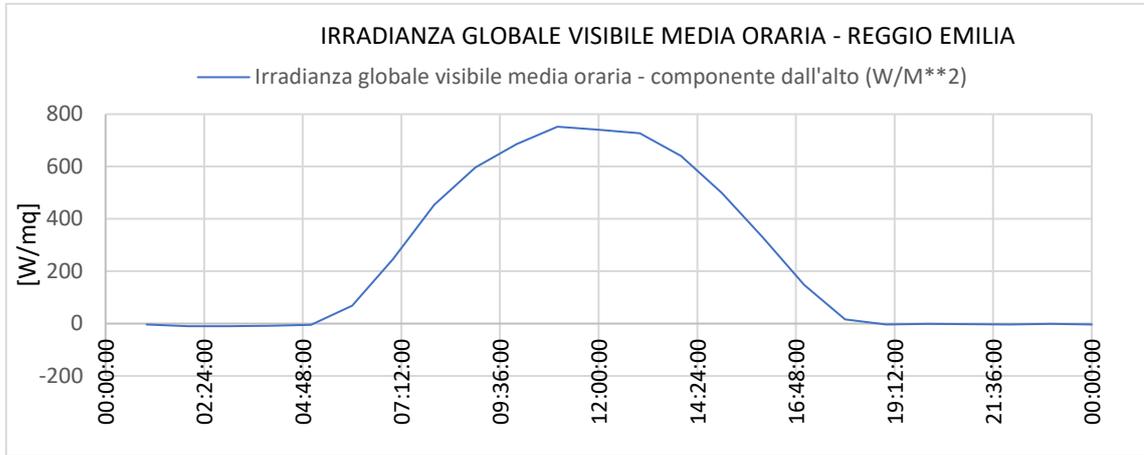


Immagine 46: irradianza globale media registrata nella provincia di Reggio Emilia in giorno 06/09/21

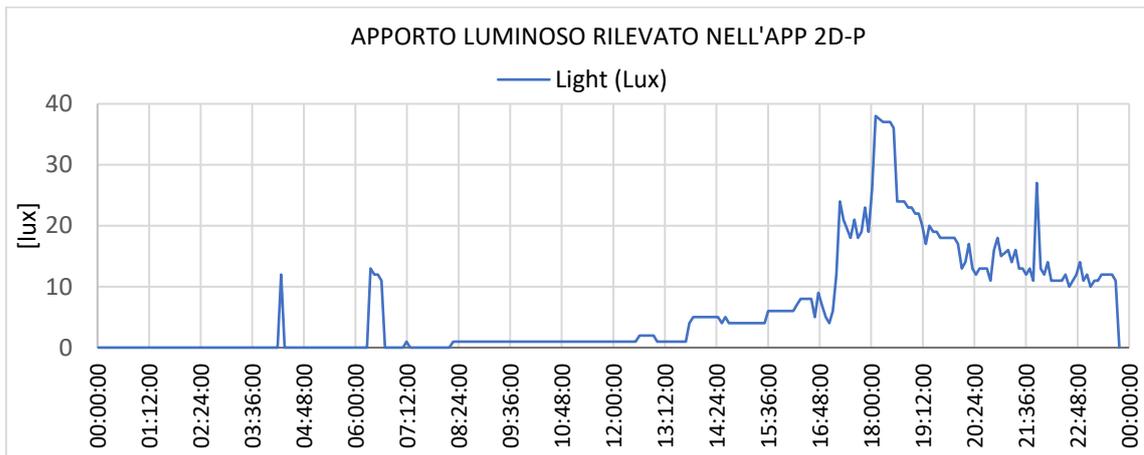


Immagine 47: apporto luminoso rilevato nel soggiorno nella giornata del 06/09/2021

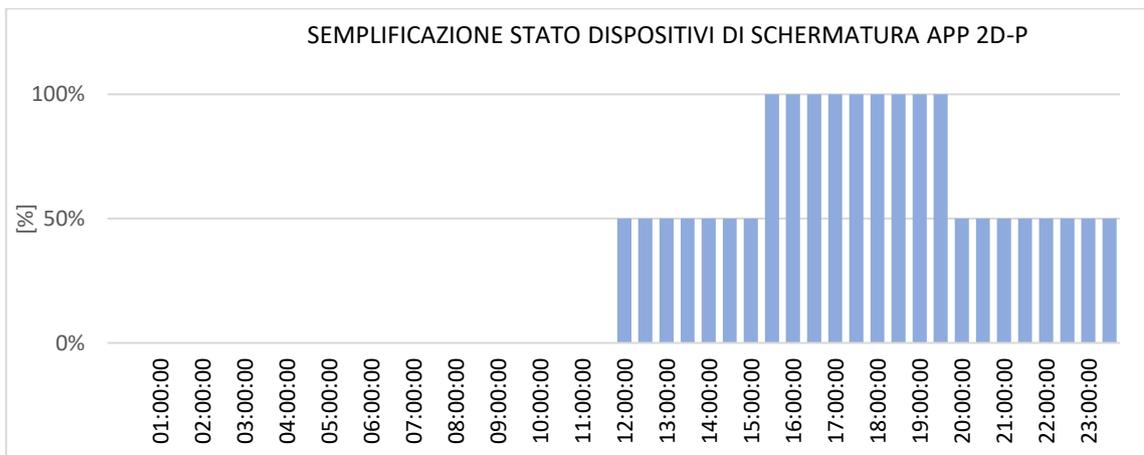


Immagine 48: stato dei dispositivi di schermatura del soggiorno nella giornata del 06/09/2021

Infine, per stimare le fasce orarie in cui gli impianti di raffrescamento sono stati accesi, sono stati confrontati i dati relativi ai consumi, in quanto, in corrispondenza di ogni accensione, si registra un “picco” nella variazione dell’energia consumata; e i dati relativi a variazioni di temperatura interna, non corrispondenti ad abbassamenti di temperatura esterna.

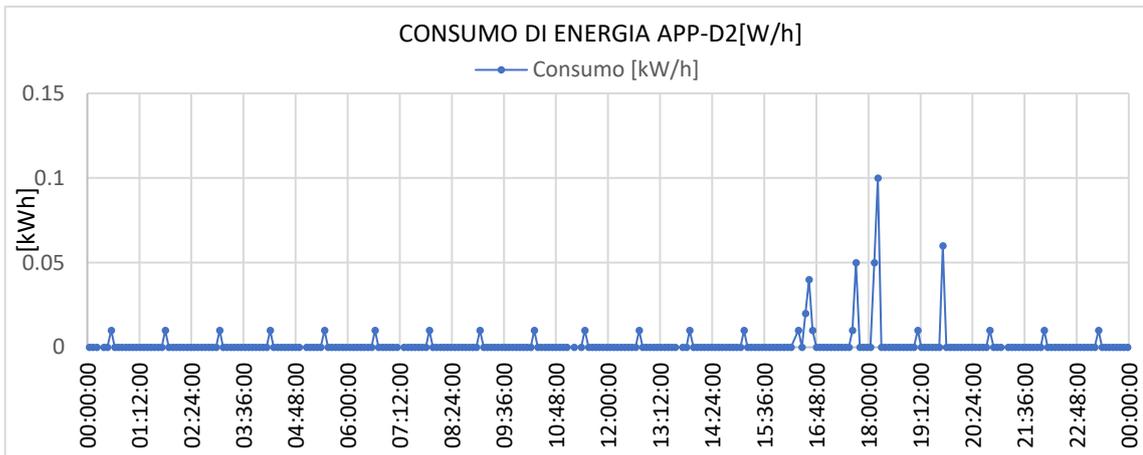


Immagine 49: energia consumata nell'appartamento occupato nella giornata del 06/09/21

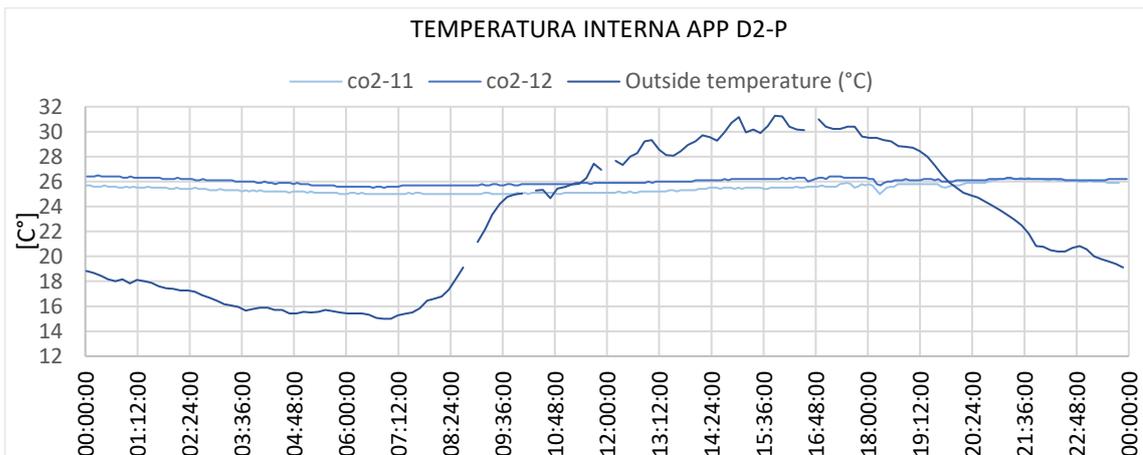


Immagine 50: andamento della temperatura rilevato dai sensori co2-11 e co2-12 relativi alla giornata del 06/09/2021



Immagine 51: stato dell'impianto di raffrescamento nella giornata del 06/09/2021

La stessa analisi è stata svolta per ogni giorno, relativamente alla zona giorno e alla zona notte.

## 6.2 Creazione dei profili di occupazione nel modello

In base al monitoraggio dei dati nell'appartamento occupato, al fine di ottenere una simulazione più accurata ed aver minor discrepanza tra i dati misurati e quelli in output da Design Builder, sono state create delle schedule rappresentanti i profili di occupazione, per il soggiorno e per la camera da letto; in particolare si è sintetizzato:

- Il movimento degli occupanti, espresso in valori da 0 a 1, in cui 0 rappresenta totale assenza di movimenti rilevati e 1 il massimo valore espresso dai sensori per tutto il periodo considerato;
- L'utilizzo o meno dei dispositivi schermanti, sulla base del valore di luce rilevata, in relazione all'irradianza globale media esterna;
- L'apertura o chiusura delle finestre, sulla base dei valori di anidride carbonica, in relazione alla concentrazione esterna e a quella degli ambienti non occupati;
- Lo stato degli impianti, sulla base dei consumi. A seguito di un'intervista condotta all'inquilina dell'appartamento, è emerso che, durante il periodo preso in considerazione, era solita accendere solo l'impianto di raffrescamento presente nel disimpegno poiché, grazie a quello, riusciva a raggiungere una temperatura di comfort in entrambe le stanze considerate. Per questo motivo, all'interno del modello Design Builder, sarà considerato acceso solo un impianto HVAC.

SCHEDULA	SOGGIORNO	CAMERA DA LETTO
Movimento degli occupanti	Schedule:Compact, Occupancy_Assembly, Fraction, Through: 2 Sep, For: Alldays, Until: 2:00, 1, Until: 3:00, 0.7, Until: 4:00, 0.5, Until: 7:00, 0, Until: 8:00, 0.75, Until: 11:30, 1, Until: 14:30, 0.6, Until: 16:30, 1, Until: 18:00, 0, Until: 21:00, 1, Until: 22:30, 0.85, Until: 24:00, 0.5, Through: 3 Sep, For: Alldays, Until: 2:00, 0.5, Until: 03:30, 0.7, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.65, Until: 11:30, 1, Until: 13:30, 0.75, Until: 14:30, 0.5, Until: 18:00, 0, Until: 20:00, 0.75, Until: 21:30, 1, Until: 22:30, 0.75, Until: 24:00, 0.5, Through: 4 Sep, For: Alldays, Until: 2:00, 0.5, Until: 03:30, 0.7, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.65, Until: 11:30, 1, Until: 13:30, 0.75, Until: 14:30, 0.5, Until: 18:00, 0, Until: 20:00, 0.75, Until: 21:30, 1, Until: 22:30, 0.75,	Schedule:Compact, Occupancy_Assembly, Fraction, Through: 2 Sep, For: Alldays, Until: 03:30, 0.8, Until: 07:30, 0, Until: 09:30, 0.6, Until: 12:00, 0.75, Until: 15:00, 0, Until: 17:00, 0.8, Until: 18:00, 0, Until: 24:00, 0.85, Through: 3 Sep, For: Alldays, Until: 08:30, 0.3, Until: 14:00, 0, Until: 24:00, 0.4, Through: 4 Sep, For: Alldays, Until: 05:00, 0, Until: 09:30, 0.3, Until: 12:00, 0.2, Until: 15:00, 0.3, Until: 17:00, 0.8, Until: 18:30, 0, Until: 22:00, 0.5, Until: 24:00, 0, Through: 5 Sep, For: Alldays, Until: 06:00, 0, Until: 07:30, 0.7, Until: 09:30, 0.65, Until: 12:00, 0.75, Until: 15:00, 0, Until: 17:00, 0.8, Until: 18:00, 0, Until: 20:30, 1, Until: 24:00, 0.5, Through: 6 Sep, For: Alldays, Until: 05:00, 0, Until: 09:30, 0.3, Until: 12:00, 0.2,

	<p>Until: 24:00, 0.5, Through: 5 Sep, For: Alldays, Until: 2:00, 0.5, Until: 03:30, 0.6, Until: 04:30, 0.4, Until: 07:00, 0, Until: 11:30, 1, Until: 14:30, 0.65, Until: 16:30, 1, Until: 18:00, 0, Until: 22:30, 0.8, Until: 24:00, 0.5, Through: 6 Sep, For: Alldays, Until: 01:30, 0.5, Until: 02:00, 1, Until: 03:30, 0.5, Until: 04:00, 1, Until: 06:30, 0.5, Until: 07:00, 1, Until: 16:00, 0, Until: 21:00, 0.3, Until: 22:00, 1, Until: 24:00, 0,</p>	<p>Until: 15:00, 0.3, Until: 17:00, 0.8, Until: 18:30, 0, Until: 22:00, 0.5, Until: 24:00, 0, Through: 8 Sep, For: Alldays, Until: 10:30, 0, Until: 15:30, 0.3, Until: 19:30, 0, Until: 24:00, 0.4,</p>
<p>Posizione dispositivi schermanti</p>	<p>Schedule:Compact, Occupancy_Assembly, Fraction, Through: 2 Sep, For: Alldays, Until: 10:00, 0, Until: 12:00, 1, Until: 15:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 13 Sep, For: Alldays, Until: 13:00, 0, Until: 15:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 15 Sep, For: Alldays, Until: 24:00, 0, Through: 16 Sep,</p>	<p>Schedule:Compact, Occupancy_Assembly, Fraction, Through: 2 Sep, For: Alldays, Until: 10:00, 0, Until: 12:00, 1, Until: 15:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 13 Sep, For: Alldays, Until: 13:00, 0, Until: 16:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 14 Sep, For: Alldays, Until: 16:30, 0, Until: 18:30, 1,</p>

	For: Alldays, Until: 15:00, 0, Until: 15:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 17 Sep, For: Alldays, Until: 12:00, 0, Until: 13:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 18 Sep, For: Alldays, Until: 24:00, 0, Through: 19 Sep, For: Alldays, Until: 6:30, 0, Until: 8:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 20 Sep, For: Alldays, Until: 7:30, 0, Until: 8:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 21 Sep, For: Alldays, Until: 13:00, 0, Until: 15:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 22 Sep, For: Alldays, Until: 14:00, 0, Until: 16:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Alldays, Until: 24:00, 0;	Until: 24:00, 0, Through: 15 Sep, For: Alldays, Until: 15:30, 0, Until: 16:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 16 Sep, For: Alldays, Until: 16:00, 0, Until: 18:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 17 Sep, For: Alldays, Until: 16:30, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 18 Sep, For: Alldays, Until: 14:00, 0, Until: 15:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 20 Sep, For: Alldays, Until: 24:00, 0, Through: 22 Sep, For: Alldays, Until: 13:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Alldays, Until: 08:00, 0, Until: 11:00, 0, Until: 18:00, 0, Until: 20:00, 0, Until: 23:00, 0, Until: 24:00, 0;
Apertura/chiusura finestre	Schedule:Compact, Occupancy_Assembly, Fraction, Through: 2 Sep, For: Alldays, Until: 10:00, 0, Until: 15:30, 1, Until: 24:00, 0,	Schedule:Compact, Occupancy_Assembly, Fraction, Through: 2 Sep, For: Alldays, Until: 10:00, 0, Until: 15:30, 1, Until: 24:00, 0,

	<p>Through: 13 Sep, For: Alldays, Until: 12:30, 0, Until: 13:30, 1, Until: 20:30, 0, Until: 23:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 14 Sep, For: Alldays, Until: 12:00, 0, Until: 13:30, 1, Until: 20:30, 0, Until: 23:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 15 Sep, For: Alldays, Until: 12:00, 0, Until: 16:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 16 Sep, For: Alldays, Until: 12:30, 0, Until: 14:30, 1, Until: 17:00, 0, Until: 18:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 17 Sep, For: Alldays, Until: 12:30, 0, Until: 13:00, 1, Until: 17:00, 0, Until: 21:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 18 Sep, For: Alldays, Until: 13:30, 0, Until: 16:30, 1, Until: 20:30, 0, Until: 21:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 19 Sep, For: Alldays, Until: 9:30, 0, Until: 11:00, 1, Until: 24:00, 0,</p>	<p>Through: 13 Sep, For: Alldays, Until: 12:30, 0, Until: 19:00, 1, Until: 21:30, 0, Until: 23:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 14 Sep, For: Alldays, Until: 14:30, 0, Until: 15:30, 1, Until: 21:30, 0, Until: 23:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 15 Sep, For: Alldays, Until: 14:30, 0, Until: 15:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 16 Sep, For: Alldays, Until: 12:00, 0, Until: 19:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 17 Sep, For: Alldays, Until: 6:30, 0, Until: 7:30, 1, Until: 12:00, 0, Until: 19:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 18 Sep, For: Alldays, Until: 5:30, 0, Until: 8:00, 1, Until: 13:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, Through: 19 Sep, For: Alldays, Until: 24:00, 0, Through: 20 Sep, For: Alldays, Until: 13:30, 0, Until: 20:00, 1,</p>
--	---	---

	<p>Through: 20 Sep, For: Alldays, Until: 14:00, 0, Until: 19:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 21 Sep, For: Alldays, Until: 13:30, 0, Until: 19:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 22 Sep, For: Alldays, Until: 13:30, 0, Until: 19:30, 1, Until: 21:30, 0, Until: 23:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Alldays, Until: 24:00, 0;</p>	<p>Until: 24:00, 0, Through: 21 Sep, For: Alldays, Until: 13:00, 0, Until: 19:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 22 Sep, For: Alldays, Until: 13:30, 0, Until: 19:30, 1, Until: 21:30, 0, Until: 23:30, 1, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Alldays, Until: 24:00, 0;</p>
Stato impianti	<p>Schedule:Compact, Occ_Residential, Fraction, Through: 3 Sep For: Weekdays, Until: 24:00, 0.00, Through: 4 Sep, For: Weekdays, Until: 18:00, 0.00, Until: 19:00, 1.00, Until: 20:00, 0.00, Until: 21:00, 1.00, Until: 24:00, 0.00, Through: 5 Sep For: Weekdays, Until: 24:00, 0.00, Through: 6 Sep, For: Weekdays, Until: 18:00, 0.00, Until: 19:00, 1.00, Until: 20:00, 0.00, Until: 21:00, 1.00, Until: 24:00, 0.00,</p>	

Tabella 17: Definizione dei profili di occupazione nell'appartamento occupato

## 6.3 Confronto tra dati simulati e misurati

Una volta caricate le schedule sul programma Design Builder, e successivamente alla simulazione, si è proceduto confrontando i dati misurati e i dati simulati.

A seguito di una prima verifica all'interno del programma Energy Plus, si evinceva che la simulazione non rilevava le piccole differenze di temperatura dovute alla tolleranza degli impianti. Inoltre, sotto l'aspetto dei consumi energetici, si deduce che il programma non rileva l'andamento reale.

### 6.3.1 Appartamenti non occupati

Alla luce delle problematiche espresse nell'introduzione al paragrafo, per rendere il modello coerente con i dati misurati, si è deciso di impostare delle schedule, anche per gli appartamenti non occupati.

Questo procedimento ha l'obiettivo di simulare un'accensione e spegnimento dell'impianto, impostata secondo i valori di temperatura interna delle stanze considerate. Ciò è stato fatto tramite un processo iterativo, è stato impostato un meccanismo di accensione dell'impianto, che si mette in funzione ogni qual volta la temperatura interna dell'appartamento considerato, scendeva sotto i 24°, temperatura di set point per gli appartamenti sfitti.

Questa approssimazione è stata resa possibile poiché, studiando i dati misurati (come evidenziato nell' Immagine 52), si evince che i consumi sono maggiori e di conseguenza l'andamento del grafico presenza dei picchi, nei momenti in cui la temperatura risulta minore di 24°.

Questo metodo, ha permesso di rendere più coerente alla realtà anche l'andamento dei grafici delle temperature, infatti; impostando la continua alternanza tra accensione e spegnimento degli impianti di raffrescamento, nella simulazione si registrano quei picchi di temperatura minore al set point, come nella realtà.

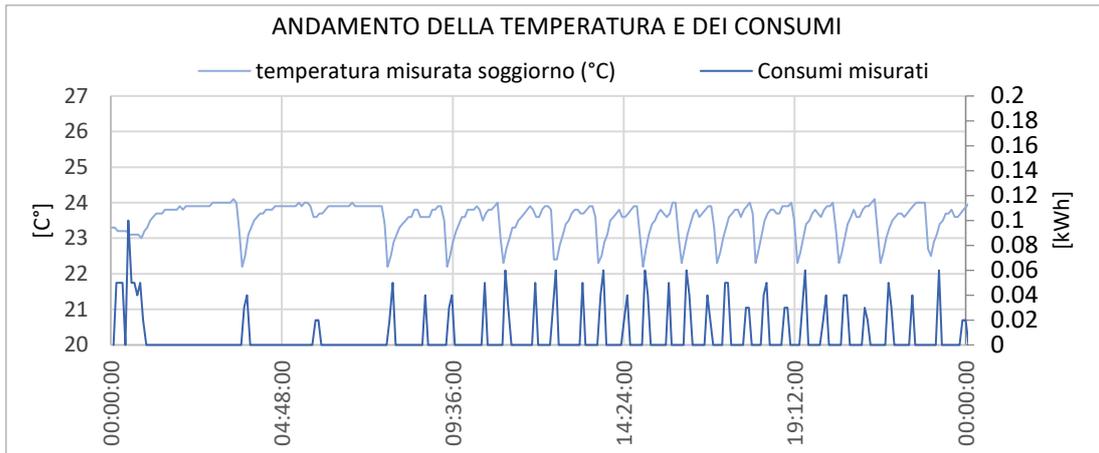


Immagine 52: Esempio dell'andamento della temperatura e dei consumi nell'appartamento A1-SOGGIORNO

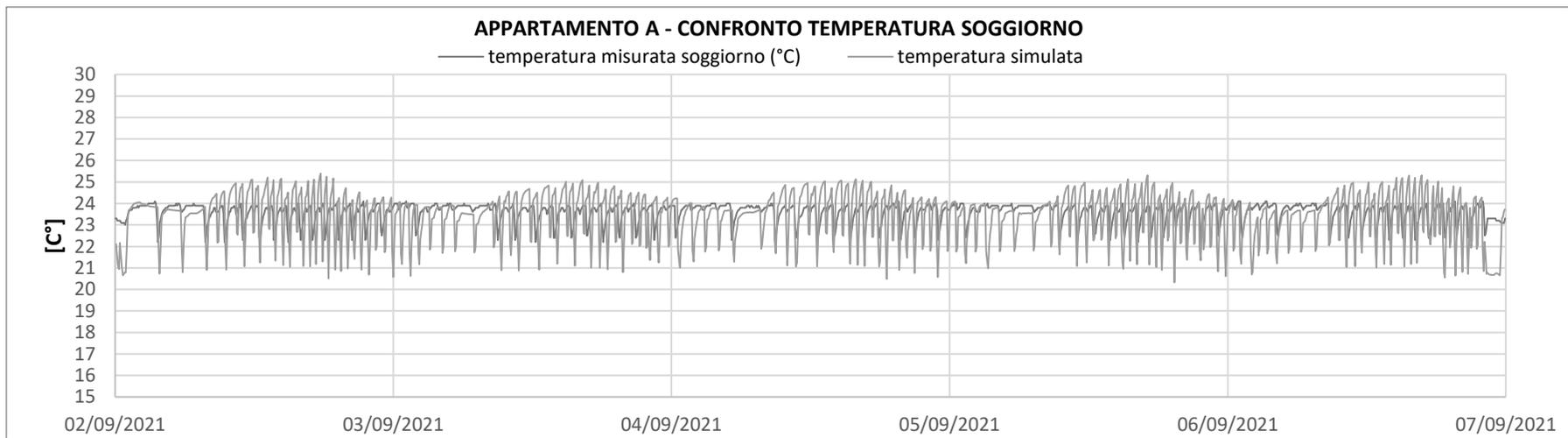
Per ogni appartamento non occupato, sono stati confrontati i dati di temperatura dell'aria ed i dati relativi ai consumi, nel periodo di tempo di riferimento.

- **Confronto tra le temperature misurate e simulate**

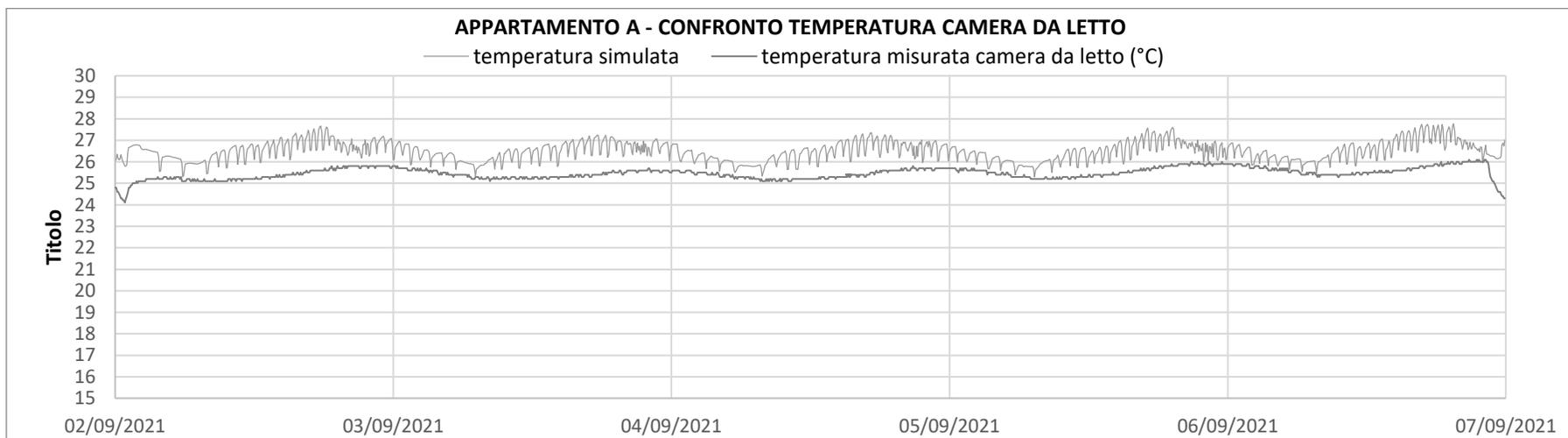
Dal confronto dei dati simulati e misurati, si evince che, si trovano meno differenze e quindi meno imprecisioni nei soggiorni, che sono le zone climatiche in cui l'impianto è fisicamente presente. Al contrario, essendo il secondo impianto posizionato nei disimpegno di ogni appartamento e monitorando la temperatura nelle camere da letto, in cui l'apporto del raffrescamento non arriva direttamente, i valori subiscono gli effetti inerziali delle pareti, e dunque si riscontrano maggiori differenze nei valori di temperatura interna.

- **Confronto tra i consumi misurati e simulati**

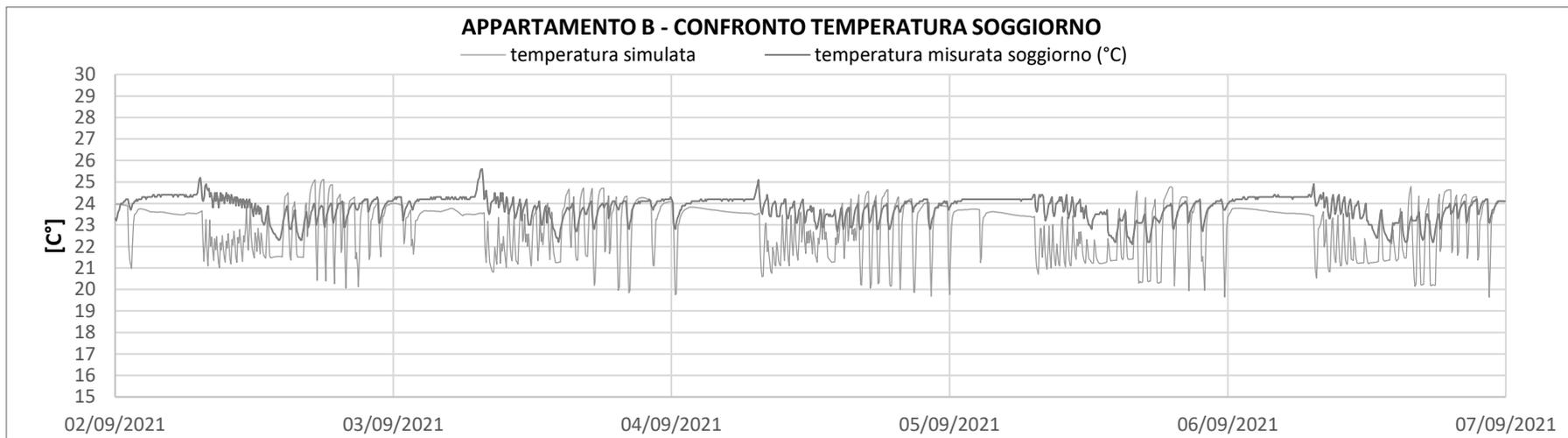
Dal confronto tra i dati misurati e simulati dei consumi, successivamente all'applicazione delle schedule sopradescritte, si evince chiara coerenza nei valori dei consumi.



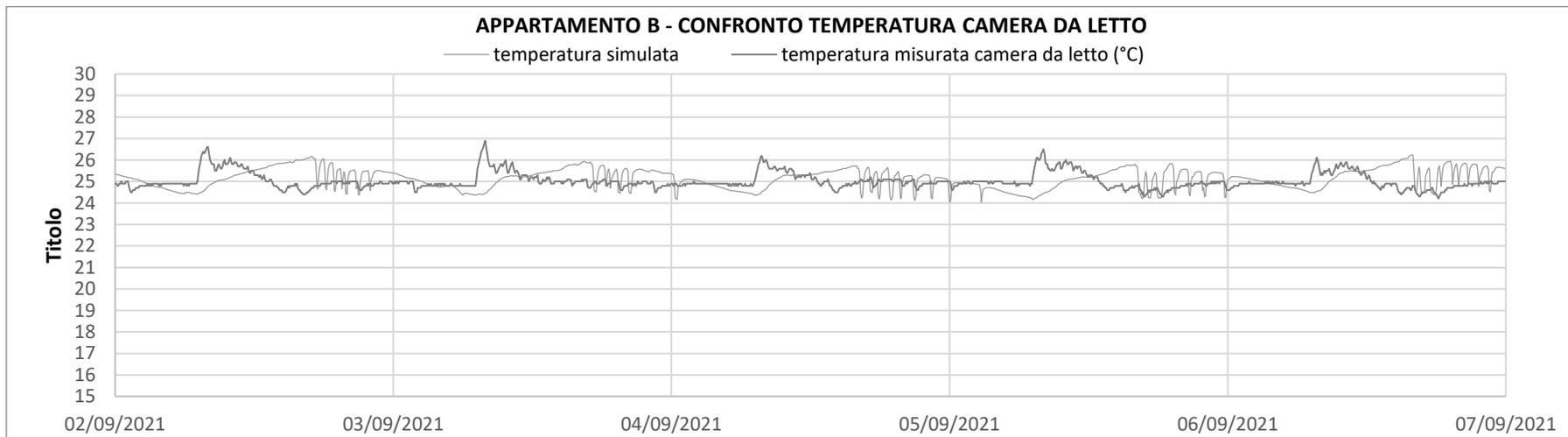
*Immagine 53: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento A*



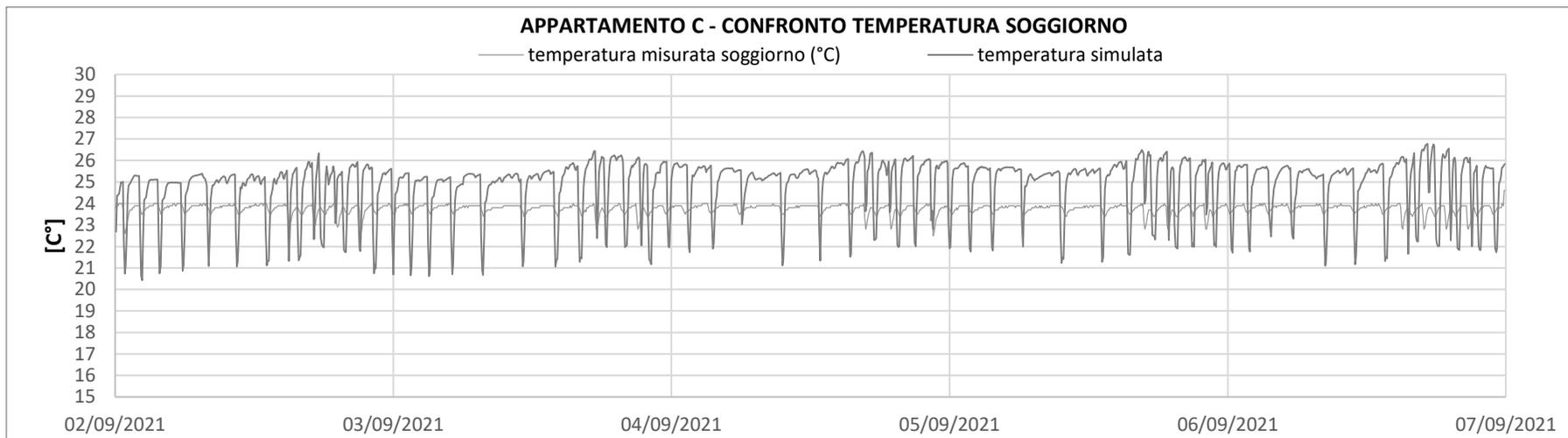
*Immagine 54: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento A*



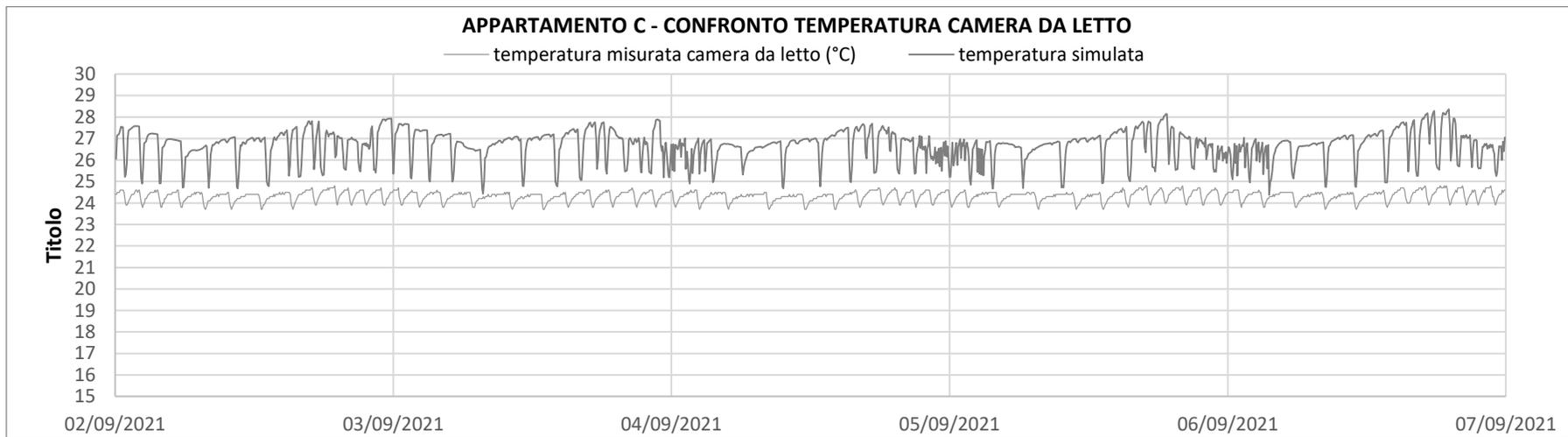
*Immagine 55: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento B*



*Immagine 56: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento B*



*Immagine 57: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento C*



*Immagine 58: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento C*

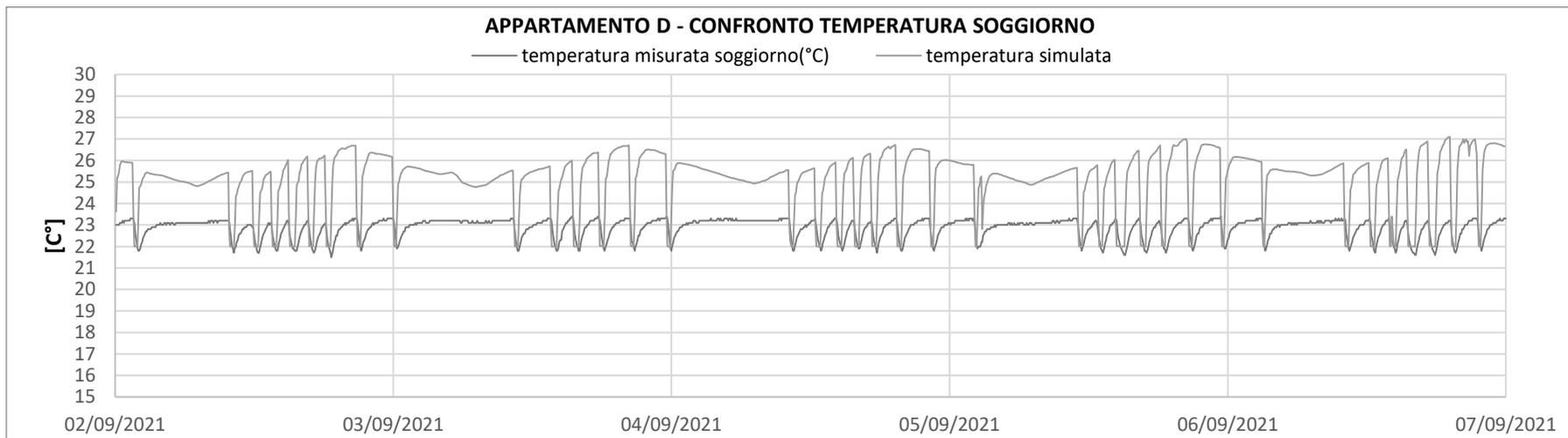


Immagine 59: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento D

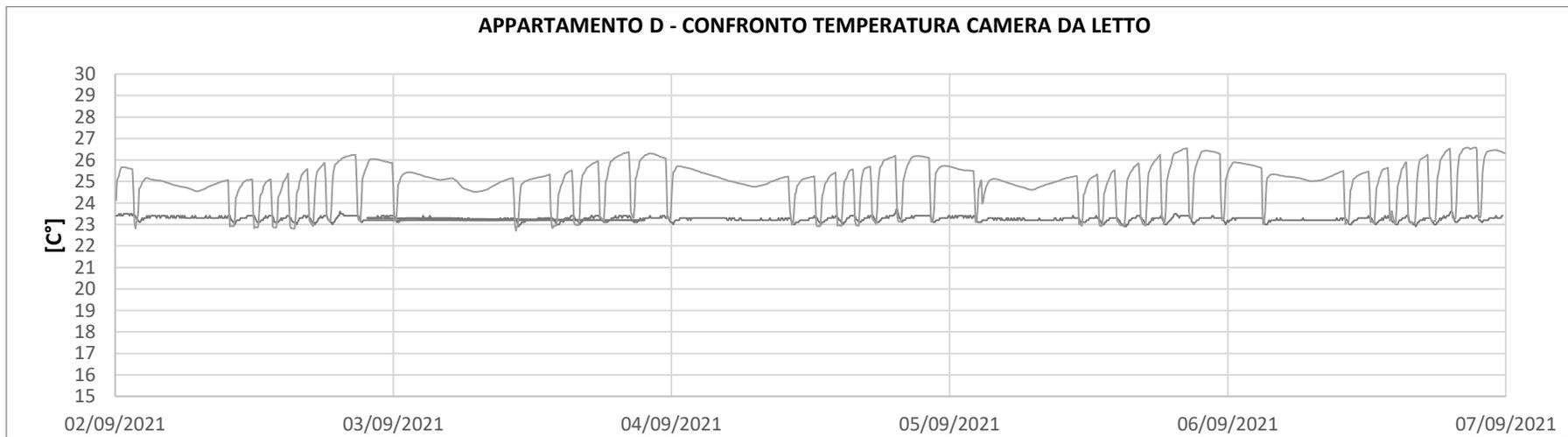
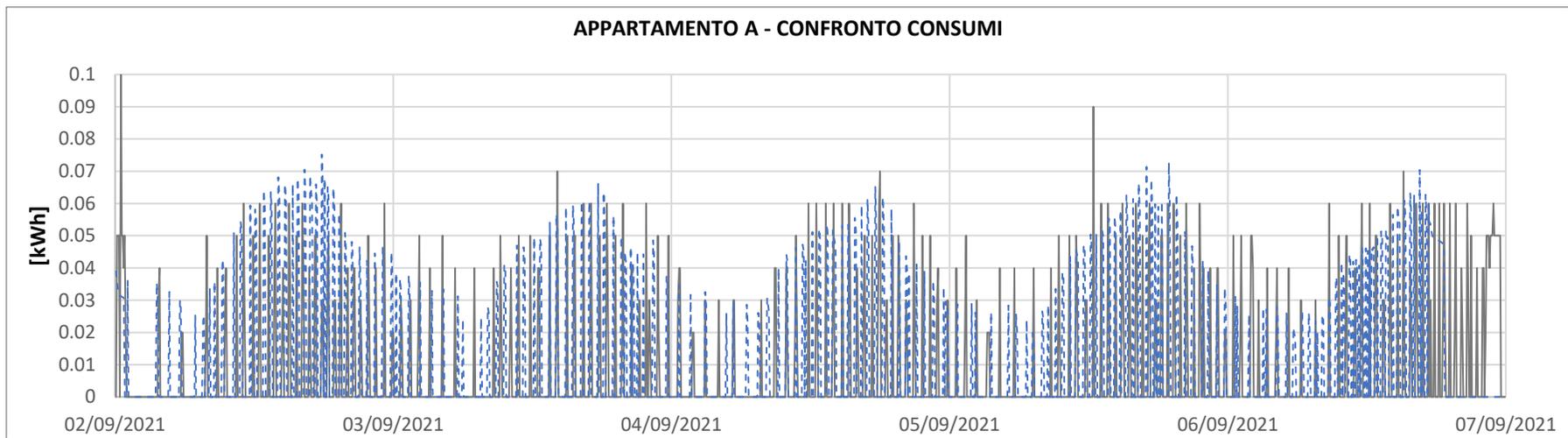
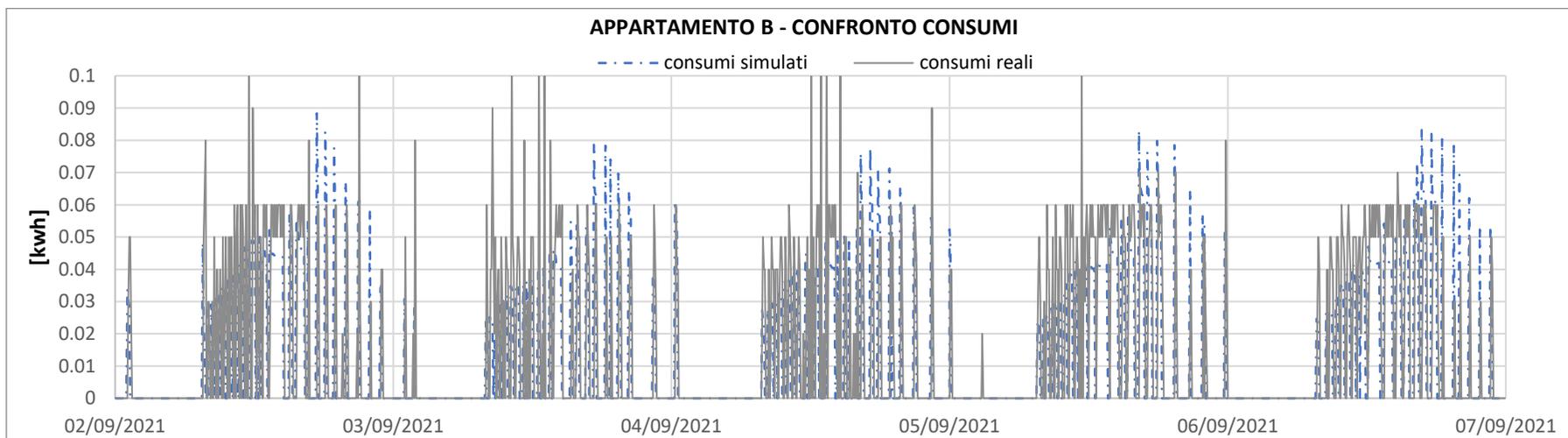


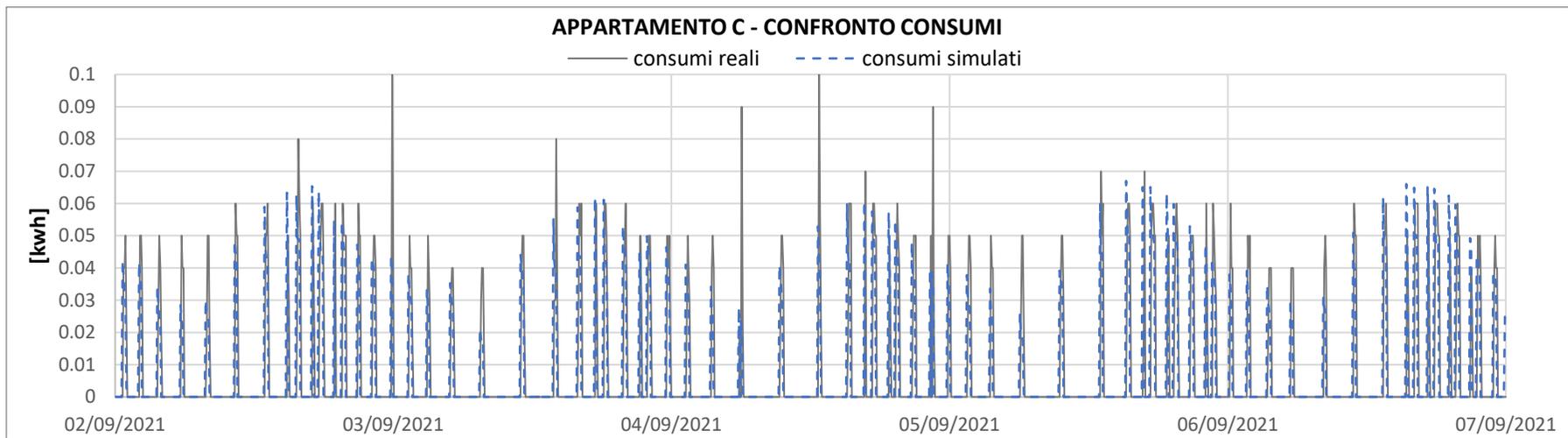
Immagine 60: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento D



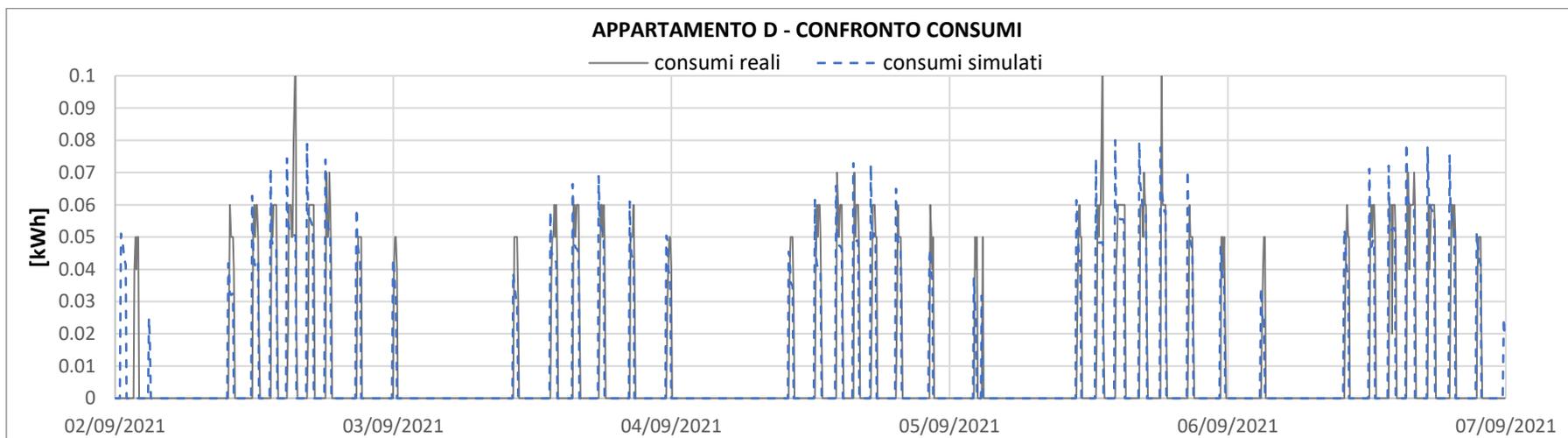
*Immagine 61: Confronto tra i consumi misurati e simulati nell'appartamento A*



*Immagine 62: Confronto tra i consumi misurati e simulati nell'appartamento B*



*Immagine 63: Confronto tra i consumi misurati e simulati nell'appartamento C*



*Immagine 64: Confronto tra i consumi misurati e simulati nell'appartamento D*

### 6.3.2 Appartamenti occupati

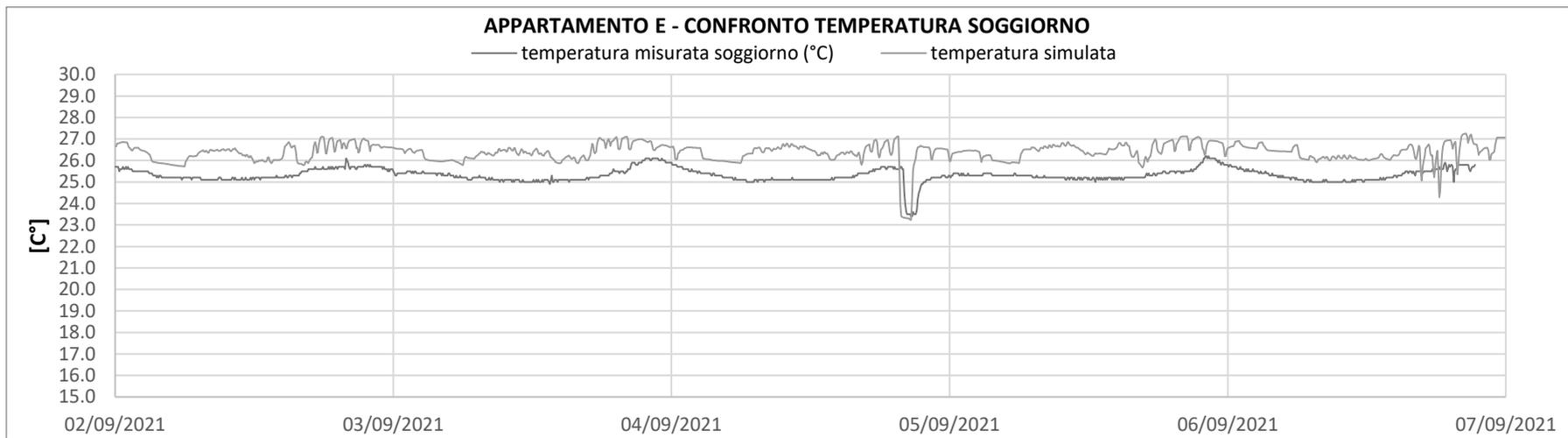
Per quanto riguarda gli appartamenti occupati sono stati confrontati altri valori quali illuminazione misurata con apporti solari delle finestre simulati e carichi interni di illuminazione simulati, i valori di apertura e chiusura delle finestre misurati con i valori di ventilazione in output dalla simulazione di Design Builder. È stato fatto questo confronto per verificare che gli apporti solari provenienti dall'esterno fossero pertinenti con i valori di illuminazione poiché anch'essi, sono parte del contributo dell'aumento di temperatura all'interno delle stanze.

- **Confronto tra le temperature misurate e simulate**

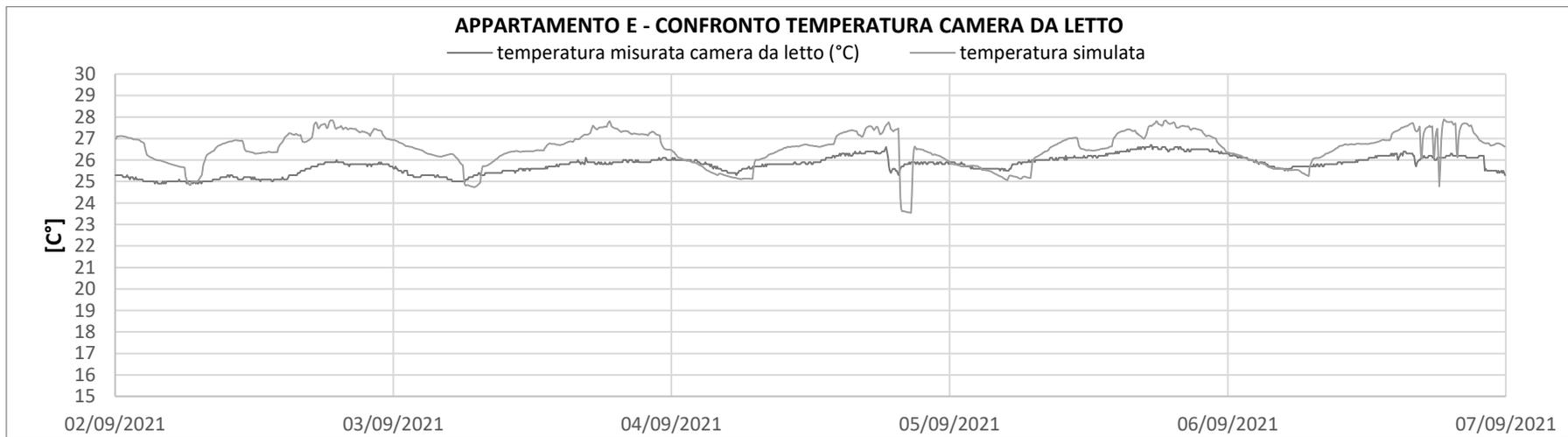
Dall'analisi delle temperature si evince corrispondenza tra quanto misurato e quanto simulato.

- **Confronto tra i consumi misurati e simulati**

Dall'analisi dei consumi, è emersa chiara corrispondenza tra quanto misurato e quanto simulato. Anche per l'appartamento occupato, a partire dalla schedula creata per rappresentare l'accensione e spegnimento degli impianti, basata sul reale comportamento degli occupanti, è stata creata un'altra schedula basata sull'abbassamento della temperatura sotto la soglia di set point.



*Immagine 65: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nel soggiorno dell'appartamento E*



*Immagine 66: Confronto tra la temperatura misurata e simulata nella camera da letto dell'appartamento E*

## 6.4 Calibrazione del modello energetico

La calibrazione dell'edificio caso studio è stata fatta prendendo in considerazione tutte le variabili e confrontando, infine, i dati di temperatura ed i dati sui consumi. Per quanto riguarda la variabile temperatura, sono stati confrontati i dati sub orari graficamente e calcolando il valore di CV (RMSE) [27] ossia il coefficiente minimo di varianza del quadro dell'errore quadratico medio.

### 6.4.1 Calibrazione del modello per gli appartamenti sfitti

La calibrazione degli appartamenti sfitti è avvenuta impostando un range del 100% di variazione dei parametri ritenuti più influente a seguito del processo di analisi di sensitività. Infatti, è stata eseguita questa analisi per determinare i parametri che hanno il maggiore impatto sull'output del modello e quelli che possono essere trascurati nel processo di calibrazione.

category	object_name	property_name	bounds	dists	initial_values
People - Schedule:Compact	Activity Schedule 44104	Field_4	[15.3, 15300]	unif	153
People - Schedule:Compact	Activity Schedule 44137	Field_4	[15.3, 15300]	unif	153
Material	Duplicated ACER_Cls armato_.15 for ACER_Pareti esterne	Density	[23.0, 23000.0]	unif	2300
Material	ACER_Cls armato_.15	Density	[23.0, 23000.0]	unif	2300
Material	ACER_Laterizio divisorio_.08	Density	[8, 8000.0]	unif	800
Material	Aerated Concrete Slab_.16	Density	[5.0, 5000.0]	unif	500
Material	Duplicated ACER_Cls armato_.15 for ACER_Pareti esterne	Conductivity	[0.023, 230]	unif	2.3
Material	ACER_Cls armato_.15	Conductivity	[0.023, 230]	unif	2.3
Material	ACER_Laterizio divisorio_.08	Conductivity	[0.004, 40]	unif	0.4
Material	ACER_XPS_.14	Conductivity	[0.00034, 3.4]	unif	0.034
Windows	Simple 1002	Solar_Heat_Gain_Coefficient	[0.0025, 25]	unif	0.25
Windows	Simple 1003	UFactor	[0.02, 200]	unif	2
Windows	Simple 1003	Solar_Heat_Gain_Coefficient	[0.0025, 25]	unif	0.25
Windows	Simple 1004	Solar_Heat_Gain_Coefficient	[0.0025, 25]	unif	0.25
Windows	Simple 1005	Solar_Heat_Gain_Coefficient	[0.0025, 25]	unif	0.25
Windows	Simple 1006	UFactor	[0.02, 200]	unif	2
Windows	Simple 1006	Solar_Heat_Gain_Coefficient	[0.0025, 25]	unif	0.25
Windows	Simple 1008	UFactor	[0.02, 200]	unif	2
HVAC	None (HVAC)	CoP	[0.01, 100.0]	unif	1

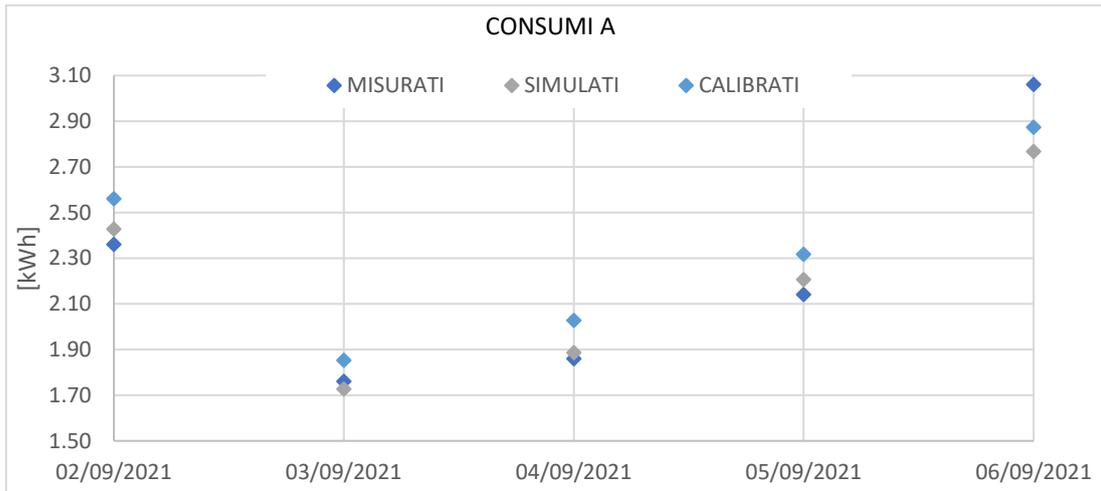
Immagine 67: File "problem" relativo all'analisi di sensitività

- **Confronto tra i consumi misurati, simulati e calibrati**

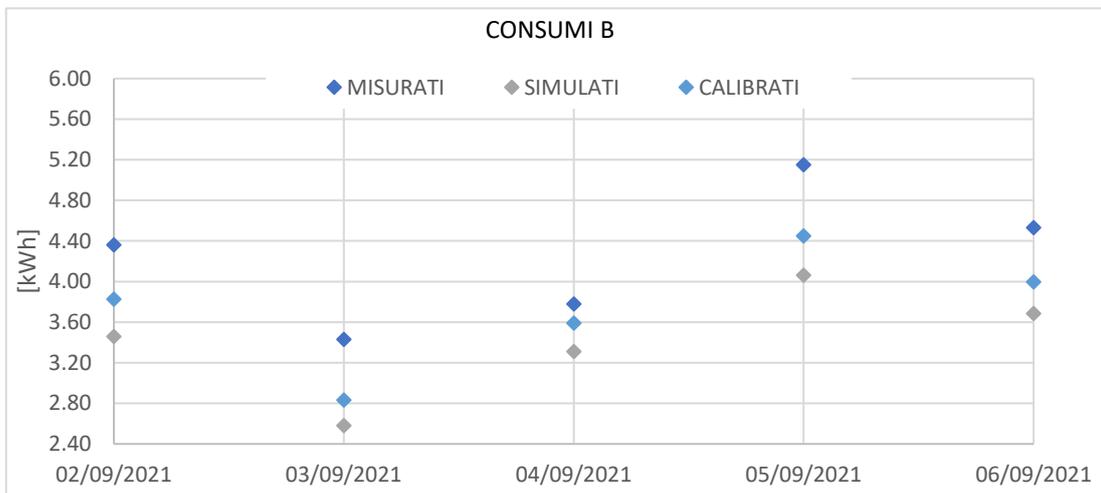
Di seguito, si riportano i valori di CV (RMSE), relativi ai consumi degli appartamenti sfitti, pre-calibrazione e post calibrazione.

<b>CONSUMI A</b>							
	MISURATI	SIMULATI	CALIBRATI	differenza	CV RMSE pre	differenza	CV RMSE post
02/09/2021	2.360	2.427	2.560	-0.067	7.56%	-0.200	6.23%
03/09/2021	1.760	1.727	1.853	0.033		-0.093	
04/09/2021	1.860	1.887	2.028	-0.027		-0.168	
05/09/2021	2.140	2.207	2.317	-0.067		-0.177	
06/09/2021	3.060	2.766	2.874	0.294		0.186	
<b>CONSUMI B</b>							
	MISURATI	SIMULATI	CALIBRATI	differenza	CV RMSE pre	differenza	CV RMSE post
02/09/2021	4.360	3.457	3.827	0.903	20.12%	0.533	12.70%
03/09/2021	3.430	2.582	2.831	0.848		0.599	
04/09/2021	3.780	3.309	3.590	0.471		0.190	
05/09/2021	5.150	4.061	4.448	1.089		0.702	
06/09/2021	4.530	3.686	3.996	0.844		0.534	
<b>CONSUMI C</b>							
	MISURATI	SIMULATI	CALIBRATI	differenza	CV RMSE pre	differenza	CV RMSE post
02/09/2021	2.45	2.442	2.471	0.008	7.29%	-0.021	7.10%
03/09/2021	1.93	1.968	2.011	-0.038		-0.081	
04/09/2021	1.92	1.592	1.604	0.328		0.316	
05/09/2021	2.14	2.103	2.109	0.037		0.031	
06/09/2021	2.41	2.529	2.515	-0.119		-0.105	
<b>CONSUMI D</b>							
	MISURATI	SIMULATI	CALIBRATI	differenza	CV RMSE pre	differenza	CV RMSE post
02/09/2021	2.700	2.659	2.598	0.041	4.54%	0.102	3.01%
03/09/2021	1.910	1.896	1.848	0.014		0.062	
04/09/2021	2.060	2.045	1.994	0.015		0.066	
05/09/2021	2.660	2.813	2.719	-0.153		-0.059	
06/09/2021	2.670	2.855	2.732	-0.185		-0.062	

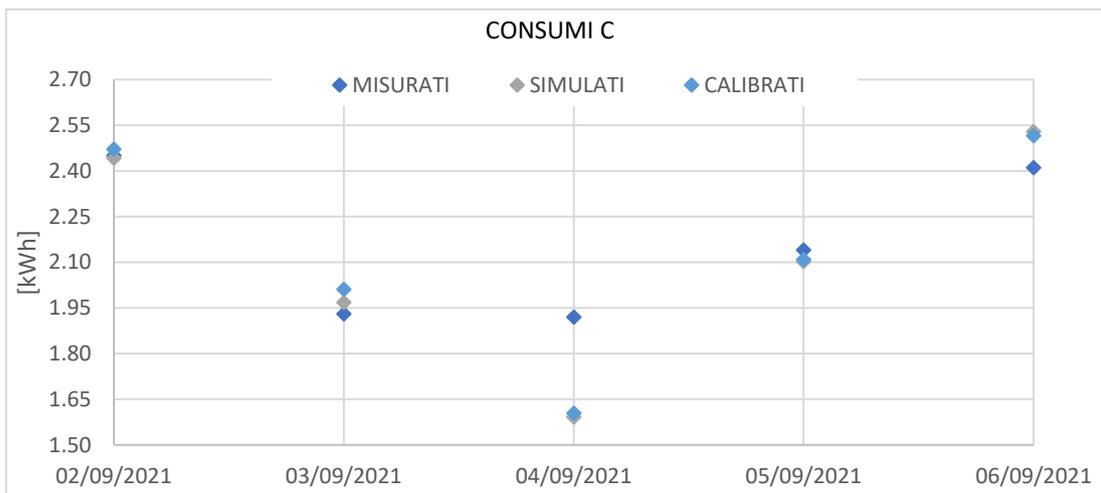
Tabella 18: confronto in termini di consumi del CV (RMSE) pre e post calibrazione appartamenti sfitti



*Immagine 68: Grafico dei consumi giornalieri dell'appartamento A*



*Immagine 69: Grafico dei consumi giornalieri dell'appartamento B*



*Immagine 70: Grafico dei consumi giornalieri dell'appartamento C*

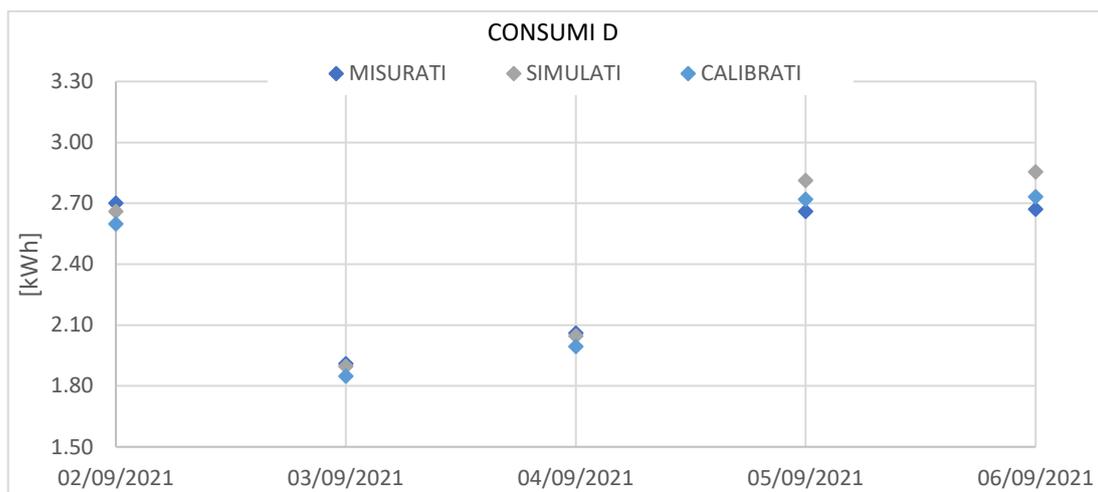


Immagine 71: Grafico dei consumi giornalieri dell'appartamento D

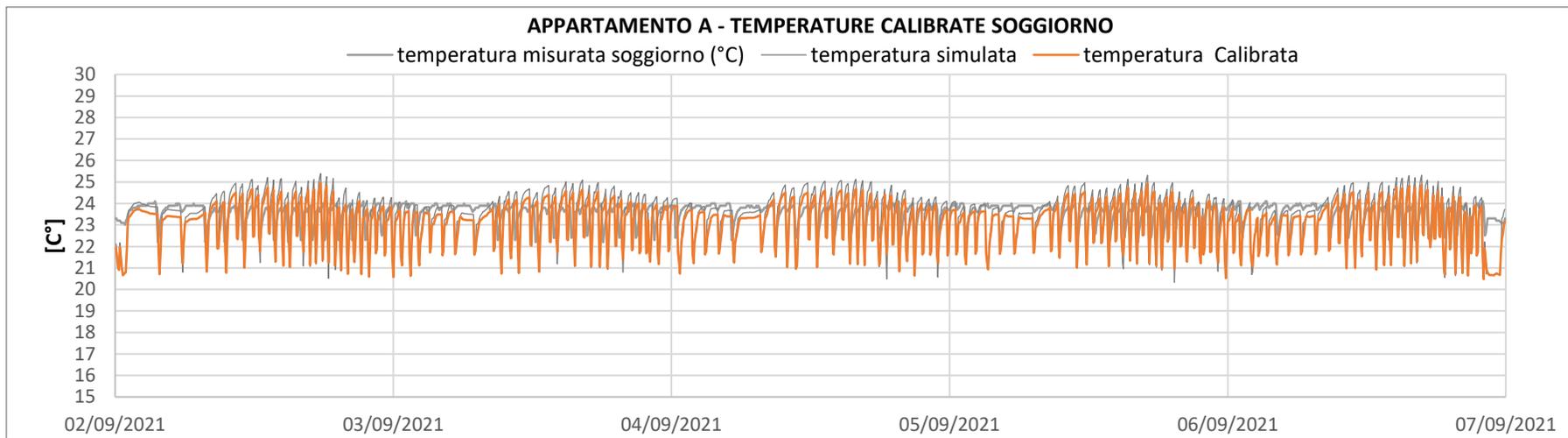
- **Confronto tra le temperature misurate, simulate e calibrate**

L'altra variabile considerata per la calibrazione del modello è la temperatura. In questo caso, per il calcolo del CV (RMSE), sono stati considerati di dati sub orari. Di seguito si riportano i valori percentuali di CV (RMSE) pre e post calibrazione.

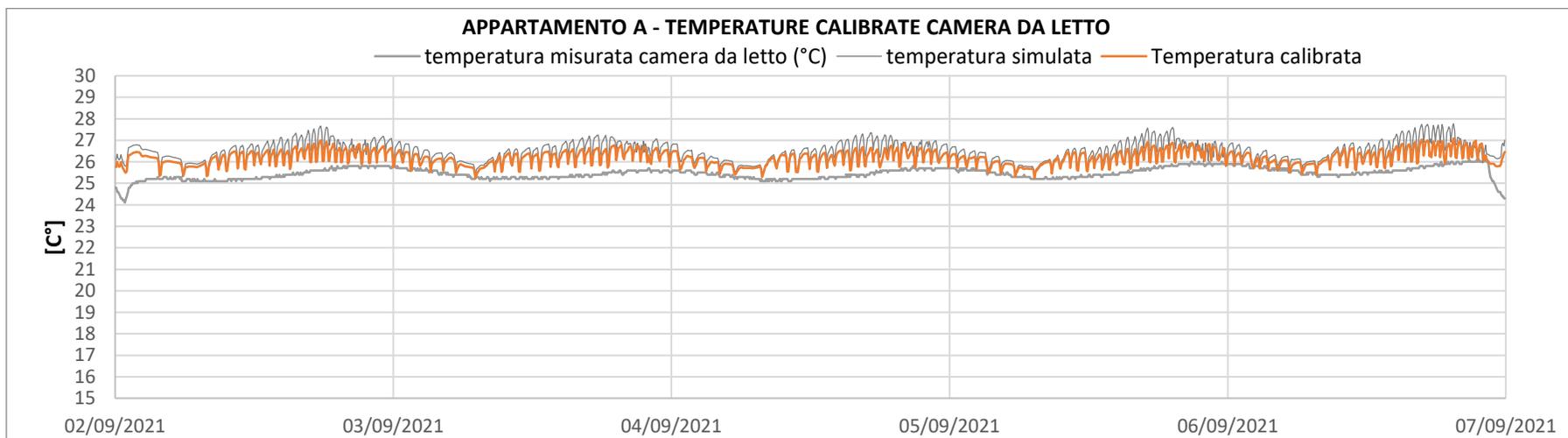
La prima considerazione che emerge è che, la calibrazione della variabile temperatura è stata più accurata nelle zone termiche degli appartamenti in cui erano propriamente sistemati i sensori. Infatti, nei soggiorni, i dati sono molto più coerenti con quello misurati, a differenza delle zone termiche "camere da letto", in cui i dati di temperatura sono meno pertinenti, in quanto non è stato possibile stabilire delle vere e proprie schedule di accensione del termostato poiché l'impianto era posizionato in un'altra stanza e dunque le temperature hanno subito delle variazioni dovute ad effetti inerziali delle pareti.

	APPARTAMENTO	CV (RMSE) PRE CAL (%)	CV (RMSE) POST CAL (%)
<b>A</b>	SOGGIORNO	5.63 %	5.50 %
	CAMERA DA LETTO	5.12 %	4.17 %
<b>B</b>	SOGGIORNO	6.76 %	6.25 %
	CAMERA DA LETTO	3.81 %	3.55 %
<b>C</b>	SOGGIORNO	7.62 %	6.55 %
	CAMERA DA LETTO	10.59 %	9.93 %
<b>D</b>	SOGGIORNO	10.82 %	10.64 %
	CAMERA DA LETTO	9.25 %	8.45 %

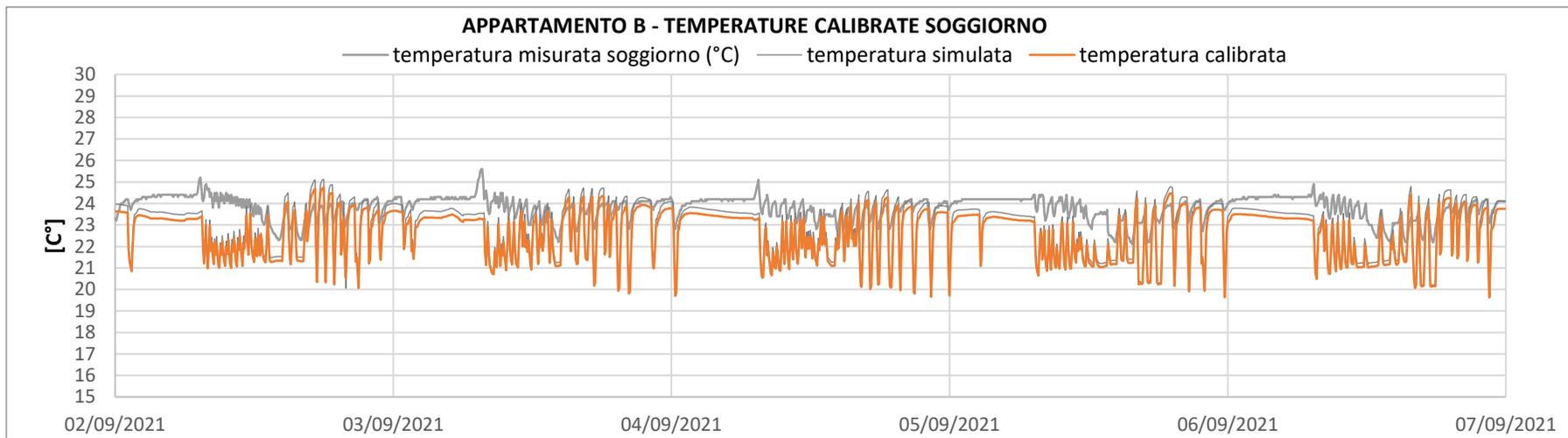
Tabella 19: confronto in termini di temperature del CV (RMSE) pre e post calibrazione appartamenti sfitti



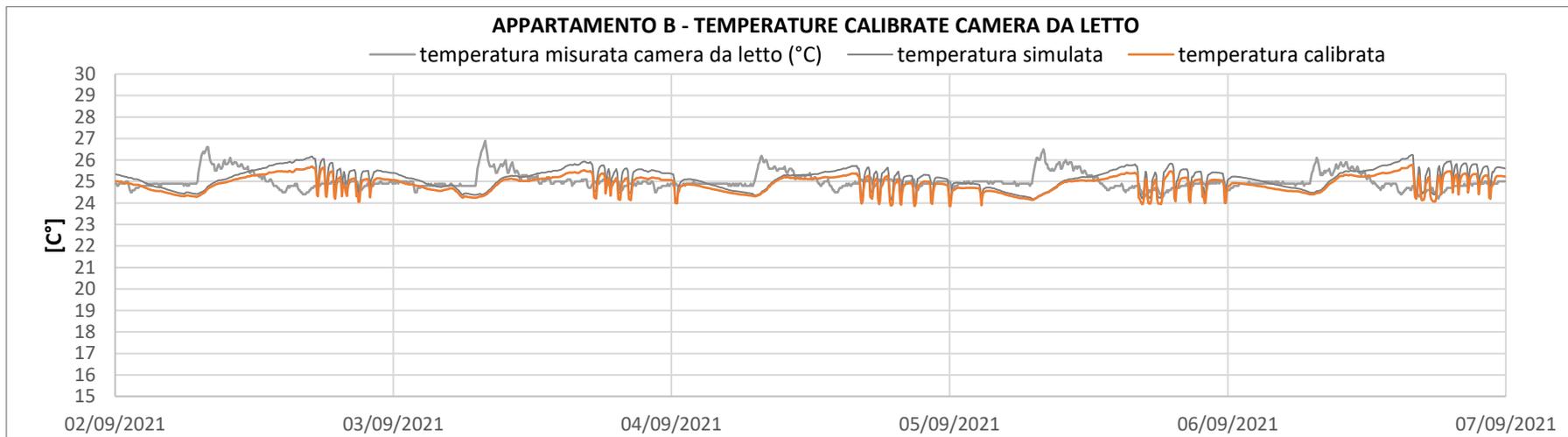
*Immagine 72: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento A soggiorno*



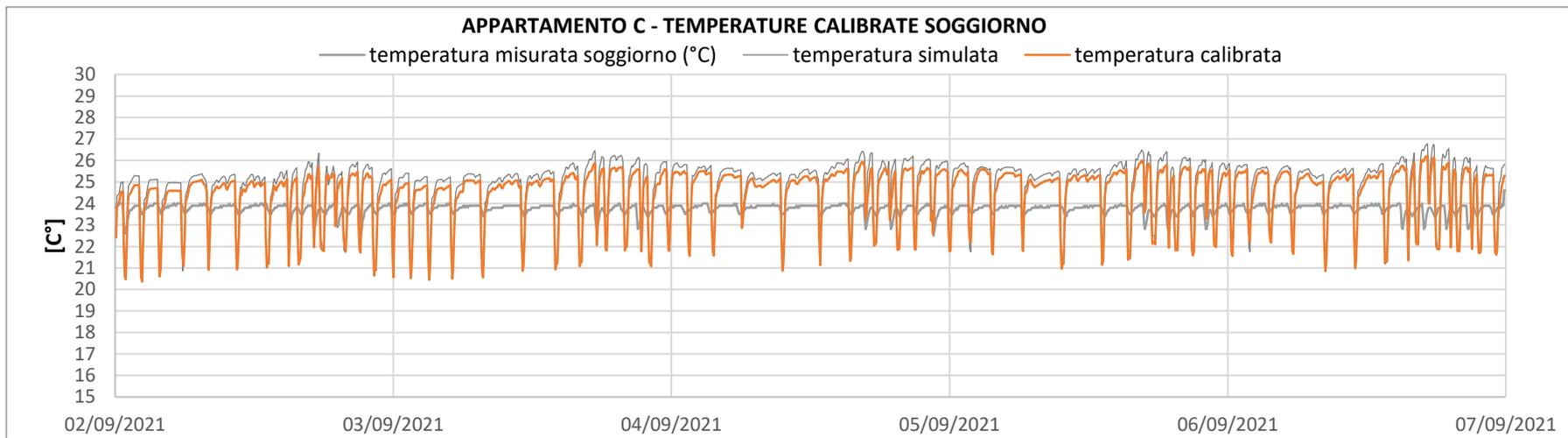
*Immagine 73: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento A camera da letto*



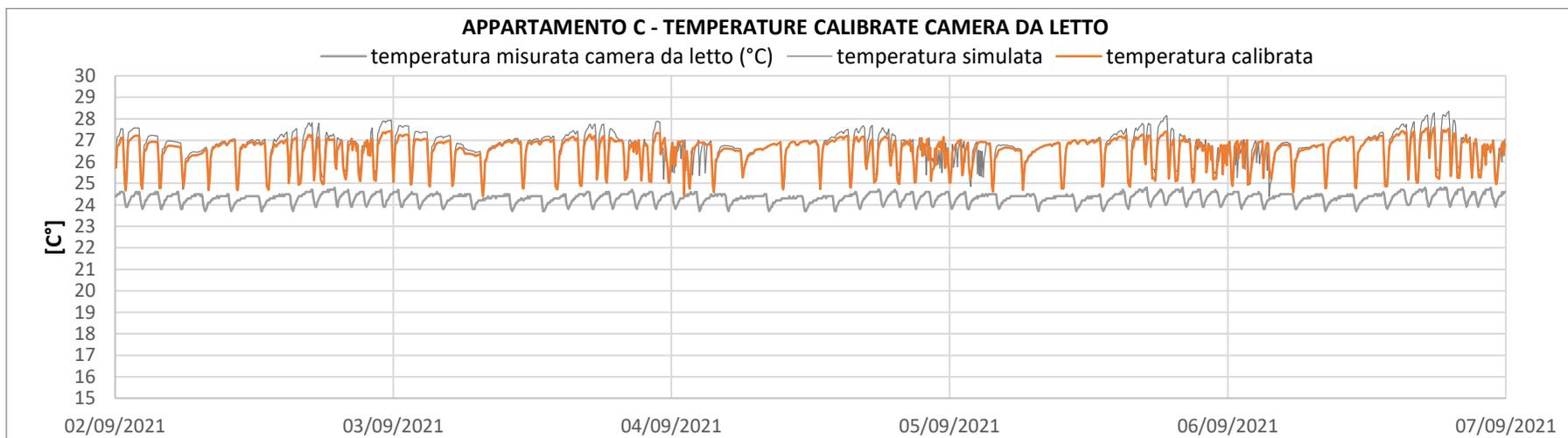
*Immagine 74: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento B soggiorno*



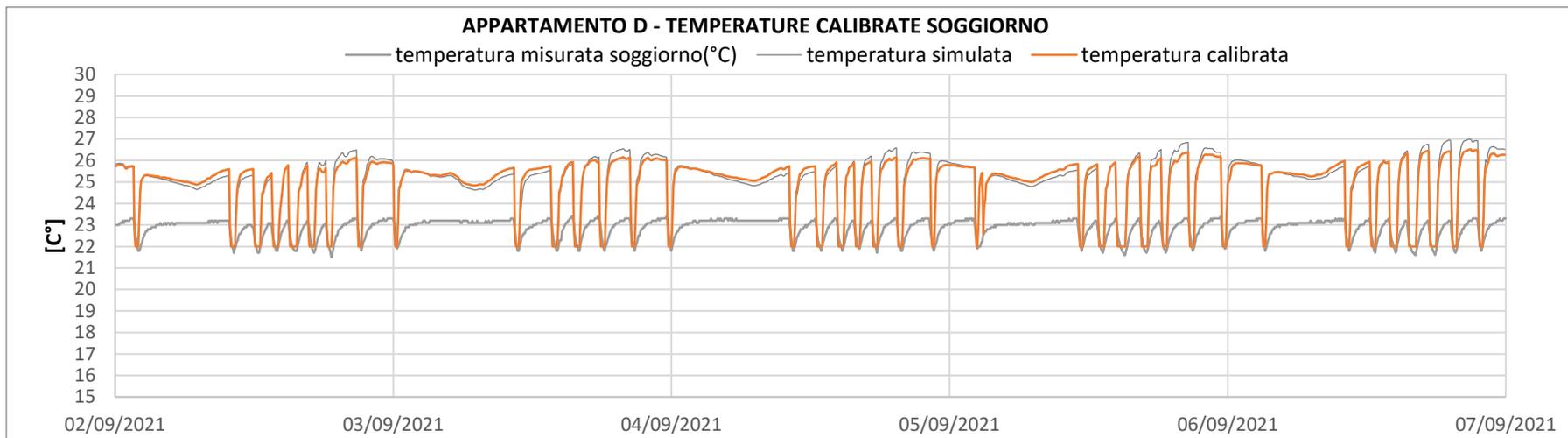
*Immagine 75: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento B camera da letto*



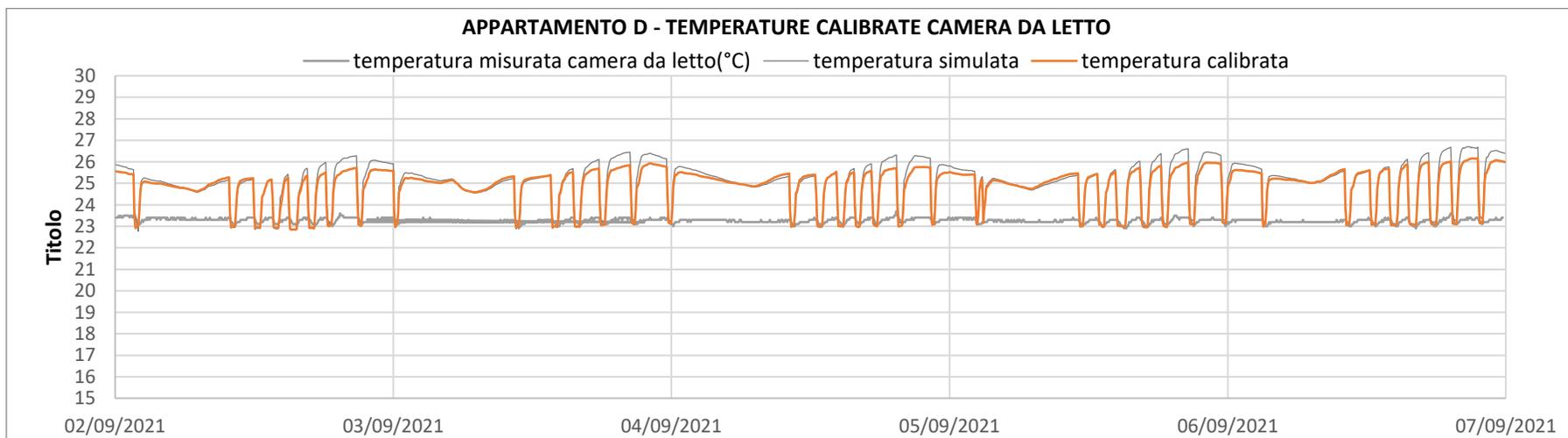
*Immagine 76: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento C soggiorno*



*Immagine 77: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento C camera da letto*



*Immagine 78: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento D soggiorno*



*Immagine 79: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata – Appartamento D camera da letto*

## 6.4.2 Calibrazione del modello con le informazioni sull'occupazione

Per quanto riguarda il calcolo dei consumi e delle temperature nell'appartamento occupato, è stata condotta una duplice calibrazione. In prima battuta è stato calibrato il modello includendo le informazioni sugli occupanti, in una seconda fase sono state rimosse le informazioni.

### - Confronto tra i consumi misurati, simulati e calibrati

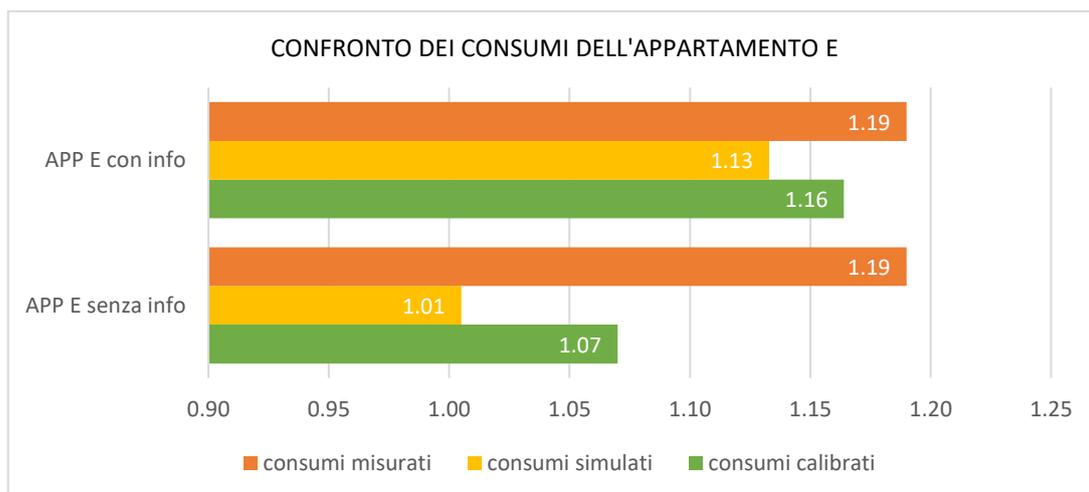
Dall'analisi dei risultati, emerge che, rimuovendo le informazioni relative agli occupanti, la calibrazione risulta meno accurata.

CONSUMI E							
	MISURATI	SIMULATI	CALIBRATI	differenza	CV RMSE pre	differenza	CV RMSE post
02/09/2021	0.000	0.000	0.000	0.000	9.81%	0.000	7.13%
03/09/2021	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	
04/09/2021	0.850	0.883	0.850	-0.033		0.000	
05/09/2021	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	
06/09/2021	0.320	0.281	0.283	0.039		0.037	

CONSUMI E SENZA INFO SUGLI OCCUPANTI							
	MISURATI	SIMULATI	CALIBRATI	differenza	CV RMSE pre	differenza	CV RMSE post
02/09/2021	0.000	0.000	0.000	0.000	22.81%	0.000	13.56%
03/09/2021	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	
04/09/2021	0.850	0.750	0.797	0.100		0.053	
05/09/2021	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	
06/09/2021	0.320	0.255	0.273	0.065		0.047	

Tabella 20: calcolo CV(RMSE) in termini di consumi con e senza informazioni sull'occupazione

Di seguito si riporta un grafico di confronto tra i consumi, circoscritti al periodo di riferimento tra il modello calibrato con le informazioni sull'occupazione ed il modello standard.



*Immagine 80: Grafico di confronto tra i valori dei consumi dell'appartamento E*

**- Confronto tra le temperature misurate, simulate e calibrate**

In linea con i valori relativi ai consumi, anche le temperature, una volta rimossa l'informazione relativa all'occupazione, risultano meno coerenti con i dati misurati.

STANZA	CV (RMSE) PRE (%)	IMPOSTAZIONE	CV (RMSE) POST (%)
<b>SOGGIORNO</b>	6.05%	CON INFO	3.29%
		SENZA INFO	5.11%
<b>CAMERA DA LETTO</b>	4.80%	CON INFO	2.60%
		SENZA INFO	3.90%

*Tabella 21: calcolo CV(RMSE) in termini di temperatura con e senza informazioni sull'occupazione*

Di seguito, si riportano dei grafici di confronto tra le temperature, relativamente ad entrambe le stanze, misurate, simulate e calibrate includendo ed escludendo le informazioni ricavate dal comportamento degli occupanti.

Dai grafici emerge che, non considerando le informazioni sull'occupazione tramite Schedule, i valori simulati e calibrati sono più lontani da quelli reali. Mentre i grafici delle temperature calibrate, risultano perfettamente allineati con la realtà, considerando i valori delle mediane (Immagine 81 e Immagine 82) e la tolleranza dei sensori pari a 0,2 °C.

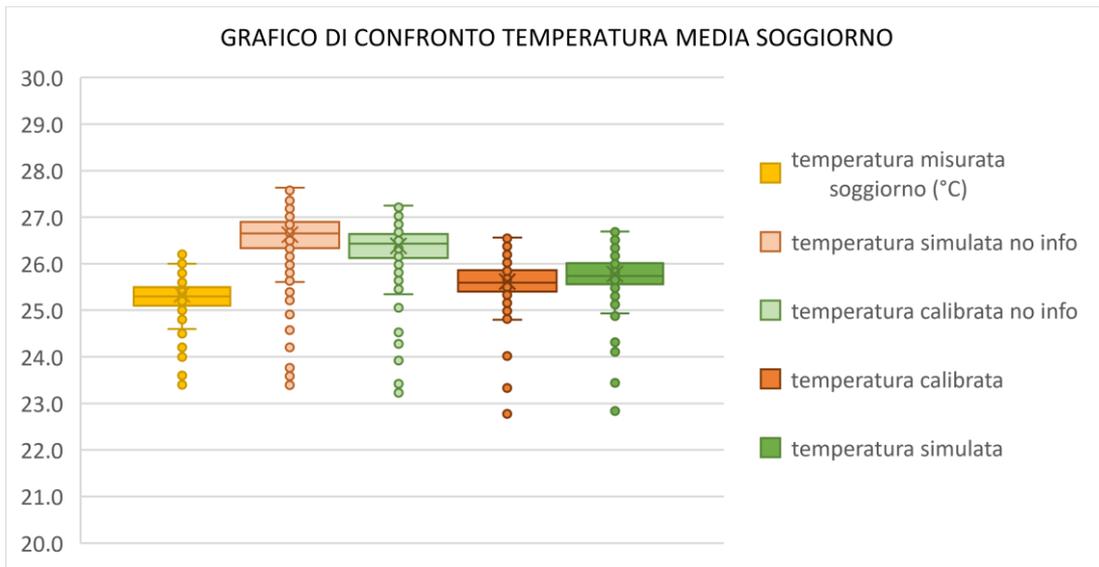


Immagine 81: Grafico di confronto delle medie dei valori di temperatura del soggiorno

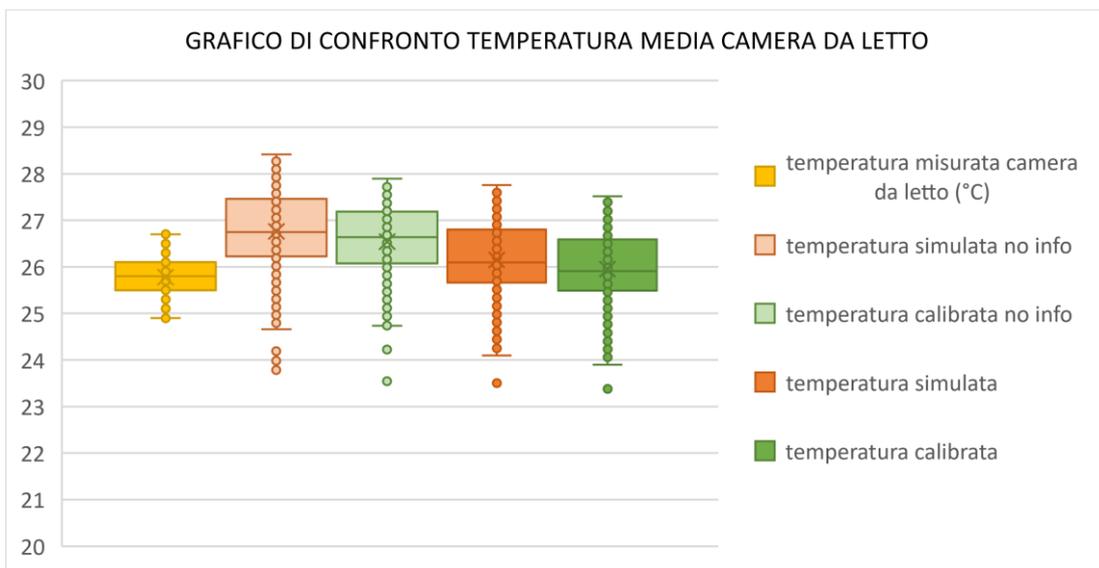
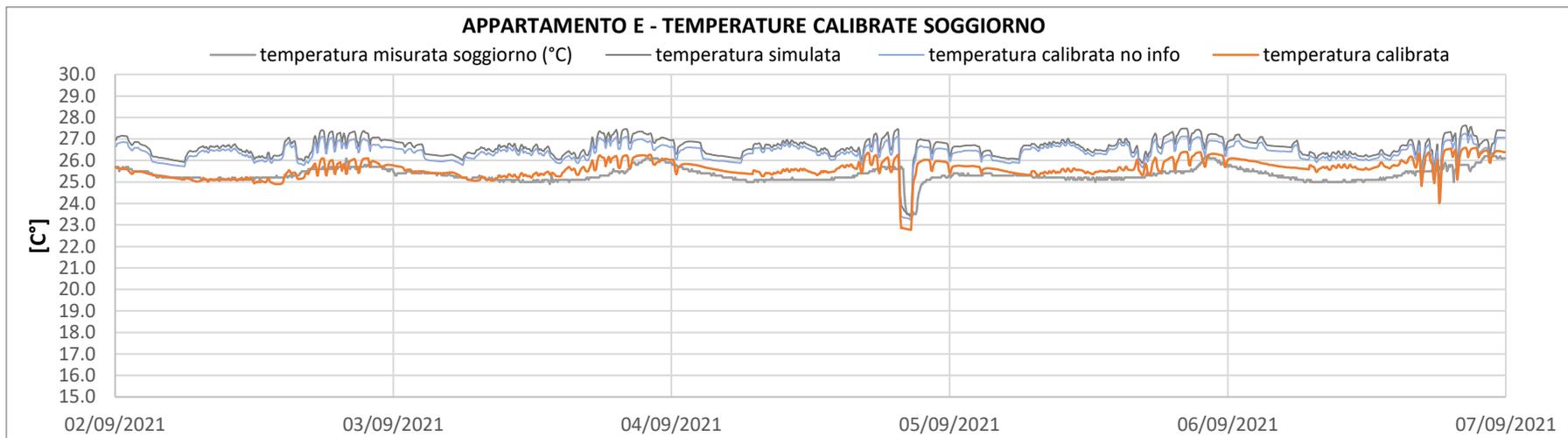
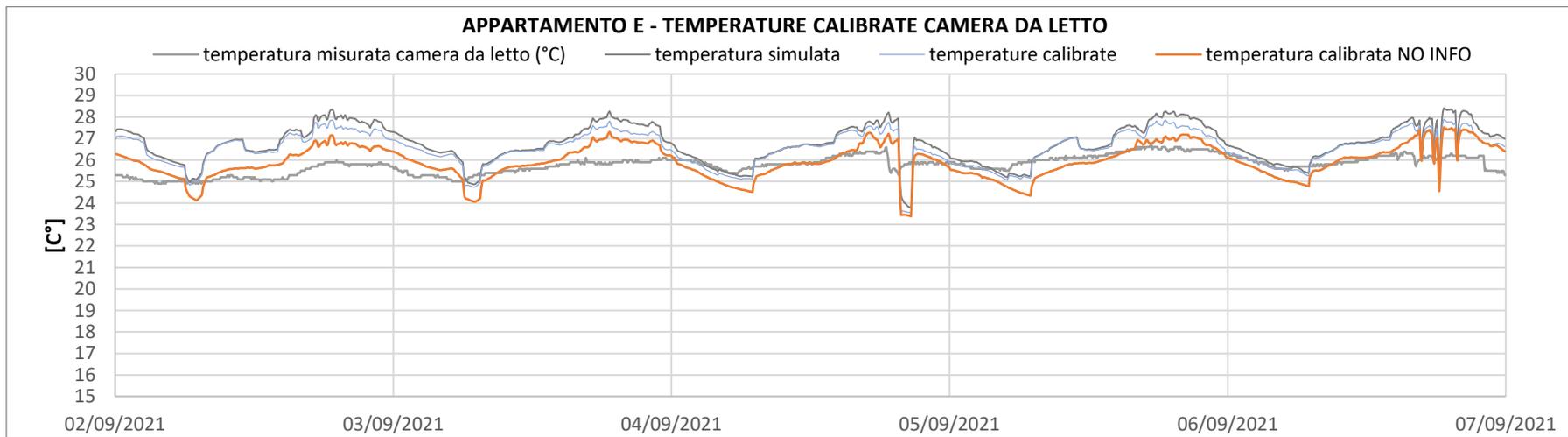


Immagine 82: Grafico di confronto delle medie dei valori di temperatura della camera da letto



*Immagine 83: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata con e senza info occupanti – Appartamento E soggiorno*



*Immagine 84: Grafico di confronto tra temperatura misurata, simulata e calibrata con e senza info occupanti – Appartamento E camera da letto*

Di seguito, si riporta una tabella riassuntiva contenente tutti i valori di CV(RMSE) relativi tutti gli appartamenti analizzati e relative stanze e dei grafici di confronto tra tutti gli appartamenti.

APPARTAMENTO	STANZA	TEMPERATURA		CONSUMI	
		CV(RMSE) PRE CAL	CV(RMSE) POST CAL	CV(RMSE) PRE CAL	CV(RMSE) POST CAL
A	Soggiorno	5.63%	5.50%	6.23%	7.56%
	Camera da letto	5.12%	4.17%		
B	Soggiorno	6.76%	6.25%	20.12%	12.70%
	Camera da letto	3.81%	3.55%		
C	Soggiorno	7.62%	6.55%	7.29%	7.10%
	Camera da letto	10.59%	9.93%		
D	Soggiorno	10.82%	10.64%	4.54%	3.01%
	Camera da letto	9.25%	8.45%		
E (con info)	Soggiorno	6.05%	3.29%	9.81%	7.13%
	Camera da letto	4.80%	2.60%		
E (senza info)	Soggiorno	6.05%	5.11%	22.81%	13.56%
	Camera da letto	4.80%	3.90%		

Tabella 22: Riassunto risultati in termini di CV(RMSE) raggiunti

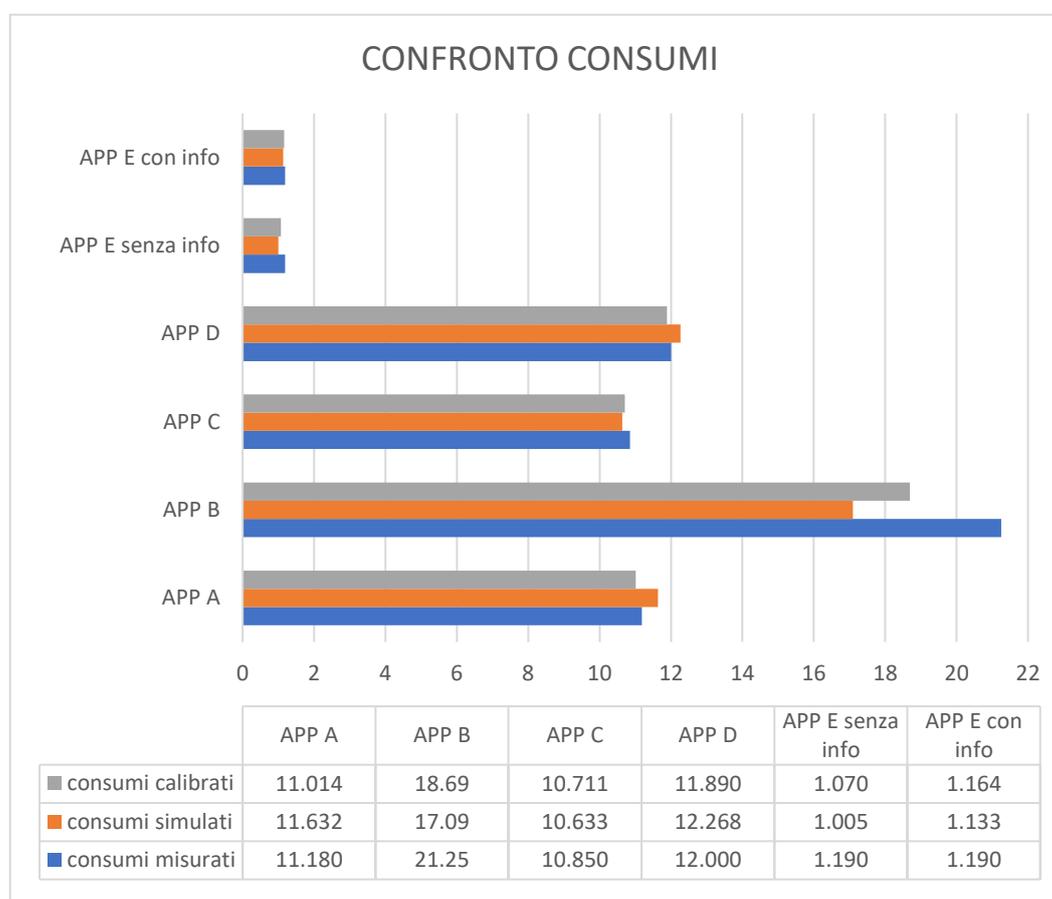


Immagine 85: Grafico di confronto tra i consumi di tutti gli alloggi analizzati

Dall'analisi delle temperature, emerge che, per quanto il modello si possa ritenere calibrato per tutti gli appartamenti, basandosi sui valori delle linee guida Ashrae, ci sono delle differenze di accuratezza tra i diversi appartamenti.

Analizzando le temperature misurate, simulate e calibrate nei soggiorni (Immagine 86), così come nelle camere da letto (Immagine 87), emergono delle differenze maggiori tra i valori negli appartamenti C e D. Una possibile motivazione potrebbe essere il fatto che, entrambi gli appartamenti, se pur con diverso stato dei sistemi schermanti, non hanno nessuna finestra esposta a nord, dunque, a differenza degli appartamenti A e B, non godono mai dell'ombra pomeridiana e la temperatura simulata, presenza dei picchi di temperatura maggiore, nonostante il contributo dell'impianto di raffrescamento.

Mentre, dall'osservazione dell'andamento e considerando i valori delle mediane dei grafici delle temperature interne agli appartamenti A e B, una volta calibrate, sono allineate con i dati misurati, considerando anche la tolleranza del sensore che è di 0,2 °C.

Infine, per quanto riguarda l'appartamento occupato, le temperature simulate cambiano notevolmente includendo o meno le informazioni sugli occupanti e, di consulenza, anche quelle calibrate, raggiungendo un valore molto ridotto di differenza tra le mediane, considerabile nullo, tenendo conto della tolleranza dei sensori.

### CONFRONTO TEMPERATURE MEDIE SOGGIORNI

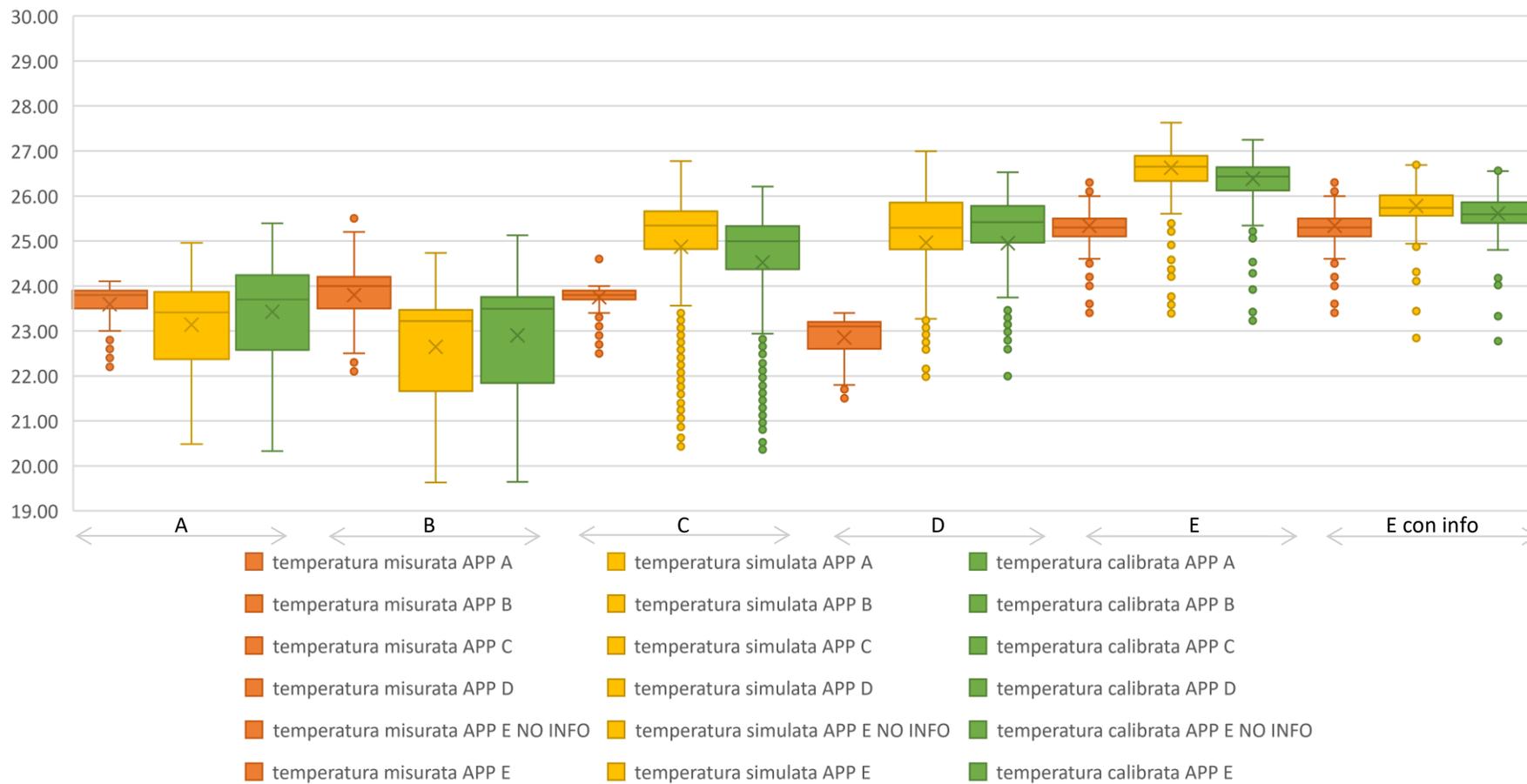


Immagine 86: Grafico di confronto temperature medie soggiorni

### CONFRONTO TEMPERATURE MEDIE CAMERE DA LETTO

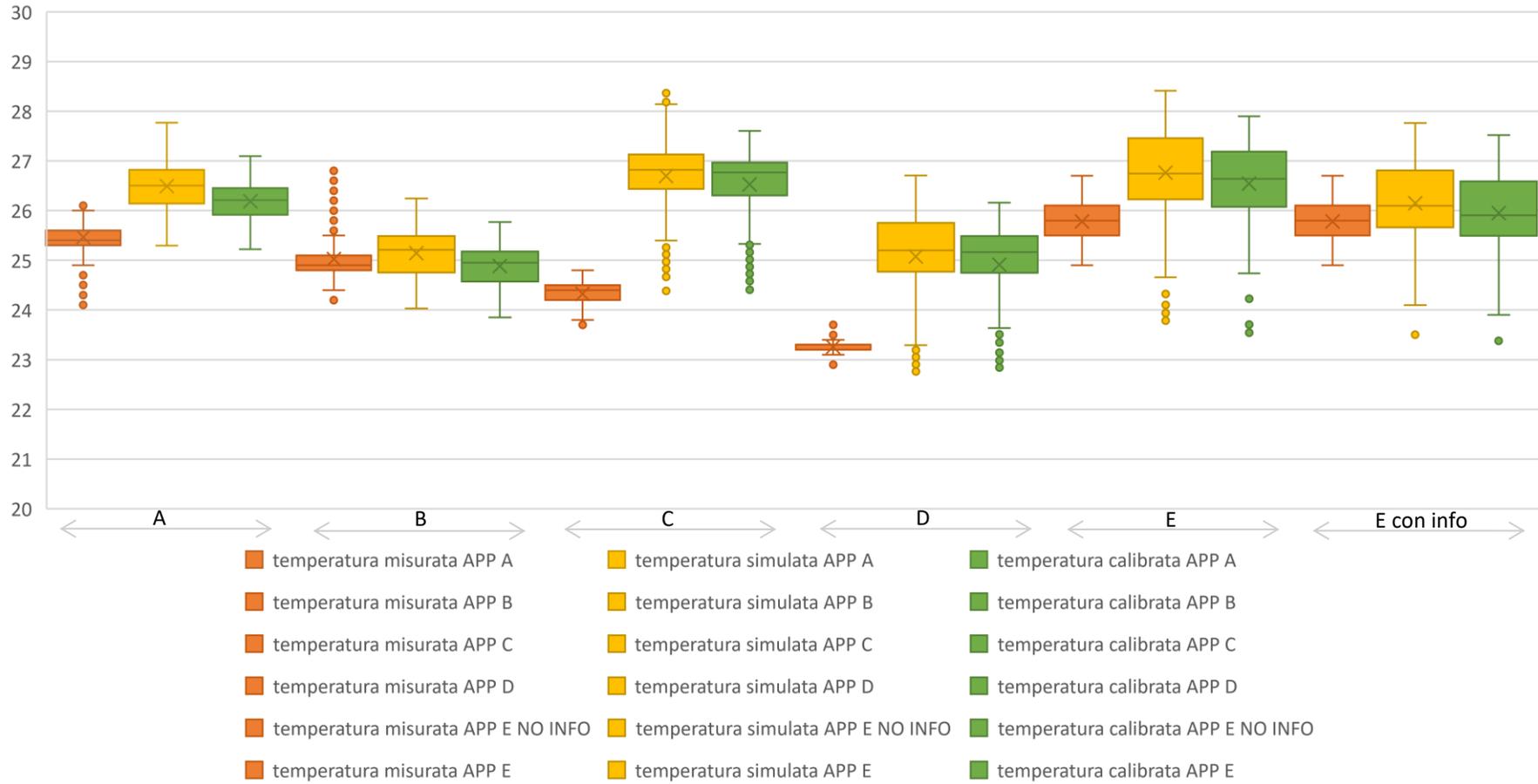


Immagine 87: Grafico di confronto temperature medie camere da letto

## 7. CONCLUSIONI

L'obiettivo della tesi è quello di determinare l'impatto che ha l'utilizzo delle informazioni sull'occupazione nel processo di calibrazione energetica di un edificio.

La strategia utilizzata a tal fine è stata quella di calibrare il modello energetico di un edificio, composto da cinque alloggi, verificando i risultati ottenuti con modelli di simulazione, rispetto ai dati effettivamente rilevati, aventi differente livello di conoscenza (informazioni specifiche sui modi d'uso quali, accensione e spegnimento impianti, apertura finestre e stato dei sistemi di schermatura).

Per quanto gli edifici residenziali siano tra le tipologie più utilizzate per i modelli di retrofit energetico, la differenza sostanziale tra questo lavoro e la letteratura precedente è la modalità di reperibilità dei dati. Infatti, utilizzando informazioni derivanti da sensori installati all'interno degli appartamenti e considerando la frequenza sub oraria dei dati, si sono raggiunti risultati più accurati e precisi, rispetto a quanto analizzato finora.

Questo è evidente in quanto, sia i valori di CV (RMSE) relativi alle temperature calibrate, sia quelli relativi ai consumi sono, in tutti gli appartamenti, minori del 20%, valore indicato dalle linee guida Ashrae per considerare un modello energetico calibrato.

Inoltre, sostituendo le informazioni sull'occupazione (accensione e spegnimento impianti, apertura e chiusura finestre, stato dei sistemi di schermatura e presenza e assenza delle persone) con dei profili standard, si evidenzia un divario maggiore tra dati misurati e calibrati, sia sotto l'aspetto delle temperature interne, sia sotto l'aspetto dei consumi ed un aumento del valore di scarto quadratico medio.

A seguito del lavoro svolto, si conclude che, per ottenere un modello di edificio realistico, come base di partenza per interventi di retrofit energetico che siano

efficienti dal punto di vista di comfort e di vantaggio economico, non è sufficiente limitarsi all'utilizzo di modello che includono programmi e regole deterministiche; bensì è necessaria un'analisi approfondita e reale sulle abitudini degli occupanti, così da definire delle schedule ed ottimizzare tutto il processo di calibrazione.

## 8. Bibliografía

- [1] R. S. ., M. U. H. H. Z. Ali Bahadori-Jahromi, «The Effect of Occupants' Behaviour on the Building Performance Gap: UK Residential Case Studies,» *MDPI*, 2022.
- [2] Y. G. H. J. Adrian Chong, «Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work,» 2021. [Online].
- [3] V. M. E. Fabrizio, «Methodologies and Advancements in the Calibration of Building Energy Models,» *Energie* 8, 2015.
- [4] D. C. I. W. S. Imam, «The building performance gap: are modellers literate,» *Build. Serv. ing. Ris. Technol.* 38, 2017.
- [5] G. e. al., «Building energy model calibration A detailed case study using sub-hourly measured data,» *Energy and Buildings*, 2020.
- [6] Y. G. H. J. Adrian chong, «Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work,» *Energy and Buildings*, 2021.
- [7] A. C. D. B. R. B. Anna Carolina Menezes, «Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap,» *Applied Energy*, 2012.
- [8] K. P. U. E. Sanam Dabirian, «Occupant-centric urban building energy modeling: Approaches, inputs, and data sources - A review,» *Energy and Buildings*, 2022.
- [9] P. E.-O. E. G.-Á. A. E.-G. Sandra Martínez-Mariño, «Simulation and validation of indoor temperatures and relative humidity in multi-zone buildings under occupancy conditions using multi-objective calibration,» *Building and Environment*, 2021.

- [10] W. T. Z. L. Y. F. F. Li, «Stepwise calibration for residential building thermal performance model using hourly heat consumption data,» *Energy and Buildings*, 2018.
- [11] Y. G. W. Y. Fatemeh Yousefi, «A study of the impact of occupant behaviors on energy performance of building envelopes using occupants' data,» *Energy and Buildings*, 2017.
- [12] M. T. D. I. C. C. Ian Richardson, «Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model,» *Energy and Buildings*, 2010.
- [13] J. L. M. M.-H. Á. B.-P. Antonio Serrano-Jiménez, «Decision-support method for profitable residential energy retrofitting based on energy-related occupant behaviour,» *Journal of Cleaner Production*, 2019.
- [14] M. M. P. A. Lamberto Tronchin, «Linking design and operation performance analysis through model calibration: Parametric assessment on a Passive House building,» *Energy*, 2018.
- [15] J. S. S. C. R. A. A.-M. A. H. Carlos Cerezo, «Comparison of four building archetype characterization methods in urban building energy modeling (UBEM): A residential case study in Kuwait City,» *Energy and Buildings*, 2017.
- [16] W. O. Z. S. Aly Abdelalim, «Data visualization and analysis of energy flow on a multi-zone building scale,» *Automation in Construction*, 2017.
- [17] P. E. L. F. E. G. Antón Cacabelos, «Development of a new multi-stage building energy model calibration methodology and validation in a public library,» *Energy and Buildings*, 2017.
- [18] M. H. M. D. J. S. Yang-Seon Kim, «Building energy model calibration with schedules derived from electricity use data,» *Applied Energy*, 2017.

- [19] X. F. Y. J. C. W. Da Yan, «The evaluation of stochastic occupant behavior models from an application-oriented perspective: Using the lighting behavior model as a case study,» *Energy and Buildings*, 2018.
- [20] T. H. M. S. Han Li, «An inverse approach to solving zone air infiltration rate and people count using indoor environmental sensor data,» *Energy and Buildings*, 2019.
- [21] Z. (. Z. Hyunwoo Lim, «Influences of energy data on Bayesian calibration of building energy model,» *Applied Energy*, 2018.
- [22] S. J. H. C. P. I. Dongsu Kim, «Model calibration of a variable refrigerant flow system with a dedicated outdoor air system: A case study,» *Energy and Buildings*, 2018.
- [23] M. C. R. S. V. M. G. R. Matteo Muratori, «A highly resolved modeling technique to simulate residential power demand,» *Applied Energy*, 2013.
- [24] «bosettiegatti.eu,» [Online]. Available: [https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1993\\_0412.htm](https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1993_0412.htm).
- [25] Midea. [Online]. Available: <https://www.mideaeurope.com/it/wp-content/uploads/Scheda-Unita-Esterne-Midea.pdf>.
- [26] SI@SIMC@ARPAE, «simc.arpae.it,» [Online]. Available: <https://simc.arpae.it/dext3r/>.
- [27] C.-J. K. J. J. b. K. C. K. Taehoon Hong, «Framework for Approaching the Minimum CV(RMSE) using Energy Simulation and Optimization Tool,» 2016 giugno.
- [29] DM 26/06/2009 "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici", 2009.

[30] «Science Direct,» [Online]. Available:

<https://www.elsevier.com/solutions/sciencedirect>.