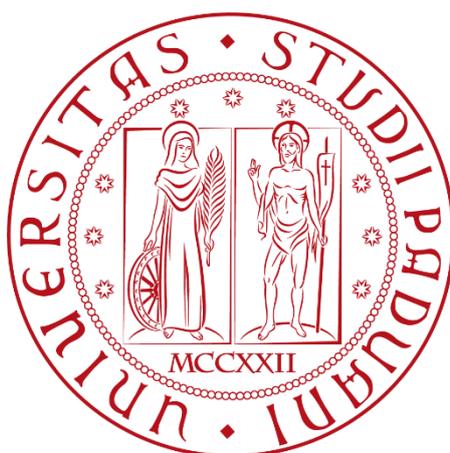


Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria Industriale

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



Analisi teorico-sperimentale di appartamenti di edilizia residenziale pubblica

Relatore

Prof. Michele De Carli

Correlatori

Ing. Giacomo Tognon

Ing. Sara Bordignon

Laureando

Rei Hoxha

Sommario

Il presente lavoro di tesi si focalizza sull'intervento sperimentale di recupero edilizio ed urbanistico di un'area rurale situata all'interno di un contesto urbano, a Vigonza (PD). L'obiettivo di questo intervento, che rientra nel programma ministeriale "CONTRATTI DI QUARTIERE II" ed è gestito dalla Regione Veneto, è la riqualificazione e la valorizzazione di un vecchio borgo rurale degli anni 30'.

Il Comune di Vigonza ha sviluppato una proposta innovativa che si discosta dalle consuete pratiche di densificazione urbana, puntando a valorizzare il carattere rurale dell'area invece di sovrapporvi una nuova edificazione intensiva. L'approccio adottato per preservare ed esaltare l'identità rurale della zona suggerisce di assegnare un ruolo strategico agli elementi naturali presenti, come suolo, vegetazione e acqua. L'obiettivo di questo caso di studio è verificare se i principi dell'architettura bioclimatica, la quale pone grande attenzione all'interazione con l'ambiente naturale, possano essere applicati in maniera efficace per migliorare il comfort termico e la qualità dell'aria, specialmente in un clima come quello mediterraneo soprattutto durante la stagione estiva, che tendenzialmente viene posta in secondo piano rispetto al benessere invernale e i consumi energetici per il riscaldamento.

Nell'ottica di una sperimentazione innovativa, il progetto prevede il monitoraggio di alcuni alloggi campione per osservarne il comportamento nel tempo e valutare l'efficacia delle soluzioni ambientali e tecnologiche adottate, in particolare per quanto riguarda il benessere termo-igrometrico, i sistemi di ventilazione naturale e meccanica, le valutazioni energetiche e l'utilizzo di tetti verdi.

Nel quadro di questo studio, è previsto lo sviluppo di un modello dinamico rappresentativo di un alloggio tipo, costruito utilizzando i dati reali raccolti dal sistema di monitoraggio, che rappresenterà un punto di partenza per future valutazioni e attività di ricerca relative a edifici in climi mediterranei.

Indice

Povert� energetica	9
1.1 Comfort termico.....	11
1.2 Indoor Air Quality (IAQ).....	13
1.2.1 Normativa europea EN 16798-1	14
1.3 Sistemi di ventilazione e raffrescamento passivo	14
1.3.1 Ventilazione naturale.....	15
1.3.1.1 <i>Meccanismi di ventilazione naturale</i>	16
1.3.1.2 <i>Camino solare</i>	17
1.3.2 Ventilazione Meccanica.....	18
1.3.3 Sistemi per il raffrescamento passivo: Tetto verde.....	19
Edifici sperimentali di edilizia sovvenzionata a Vigonza: un caso studio	23
2.1 Caratteristiche dell'involucro	26
2.2 Sistemi presenti all'interno degli alloggi.....	30
2.2.1 Pompa di calore aria - acqua.....	31
2.2.2 Pavimento radiante	32
2.2.3 Il sistema di ventilazione meccanica.....	33
2.2.3.1 <i>Sistema di ventilazione meccanica a singolo flusso (TIPO A)</i>	34
2.2.3.2 <i>Sistema di ventilazione meccanica a doppio flusso con recuperatore statico (TIPO B)</i>	35
2.2.4 Ventilazione naturale.....	37
2.2.4.1 <i>Applicazione del camino solare per la ventilazione naturale</i>	38
2.3 Sistema di monitoraggio.....	40
2.3.1 Logica di ritenzione dei dati	43
Analisi dei dati di monitoraggio.....	45
3.1 Metodologia.....	45
3.2 CO ₂	47
3.2.1 Risultati delle misurazioni di CO ₂ durante il periodo invernale.....	48
3.2.2 Risultati delle misurazioni di CO ₂ durante la stagione estiva.....	52
3.2.2.1 <i>Appartamenti Blocco C</i>	52
3.2.2.2 <i>Appartamenti Blocco D</i>	55
3.3 PM ₁₀	58
3.3.1 Risultati delle misurazioni di PM ₁₀ per il mese di marzo	58

3.3.2	Risultati delle misurazioni di PM10 durante la stagione estiva	60
3.4	Temperatura	62
3.4.1	Risultati delle misurazioni di temperature per il mese di marzo	63
3.5	Umidità Relativa	64
3.5.1	Risultati delle misurazioni di umidità relativa per il mese di marzo	65
3.5.2	Risultati delle misurazioni di umidità relativa per la stagione estiva	66
3.6	Modello del comfort termico adattivo	68
3.6.1	Metodologia	69
3.6.2	Risultati	70
3.7	Analisi dei consumi elettrici	78
3.7.1	Metodologia di confronto	78
3.7.2	Analisi periodo invernale	79
3.7.3	Analisi periodo estivo	80
	Costruzione del modello energetico di una unità abitativa	85
3.8	TRNSYS	86
3.8.1	Modellazione dell'edificio con TRNBUILD	89
3.8.1.1	<i>Carichi interni e profili di occupazione</i>	89
3.8.2	Simulation Studio	94
3.8.2.1	<i>Dati metereologici</i>	94
3.8.3	Serbatoi	95
3.8.3.1	<i>Serbatoio ACS</i>	95
3.8.3.2	<i>Serbatoio inerziale</i>	98
3.8.4	Modellazione della pompa di calore	99
3.8.4.1	<i>Funzionamento a carico parziale</i>	100
3.8.5	Modellazione del pavimento radiante	102
3.8.5.1	<i>Logiche di controllo</i>	104
3.9	Introduzione a CONTAM	106
3.9.1	Accoppiamento dinamico CONTAM – TRNSYS	108
3.9.2	Modellazione geometrica	109
3.9.3	Modellazione dei flussi	112
	Confronto tra risultati del modello e dati misurati	117
4.1	Calibrazione del modello	117
4.2	Analisi pompa di calore	124
	Conclusioni e sviluppi futuri	129

Bibliografia.....	139
Ringraziamenti	145

Introduzione

Povertà energetica

Nel contesto europeo, la povertà energetica rappresenta un problema significativo che affligge, in maniera particolare, le famiglie a basso reddito ed è proprio in tale contesto che si collocano gli edifici di edilizia sovvenzionata, noti anche come case popolari. Infatti, questa tipologia di edifici, può svolgere un ruolo cruciale nella lotta contro la povertà energetica in Italia, ma più generalmente in Europa, grazie alla loro natura pubblica. La povertà energetica viene definita come “difficoltà ad acquistare un paniere minimo di beni e servizi energetici” [1]. È un’indicazione di quanto una famiglia abbia difficoltà a coprire i costi necessari per riscaldare la casa, cucinare, illuminare l’abitazione e utilizzare elettrodomestici essenziali. Secondo l’Osservatorio Italiano sulla Povertà Energetica (OIPE), nel 2021 in Italia si registrano 2.2 milioni di famiglie in povertà energetica, pari all’ 8.5% del totale [2].

La povertà energetica è influenzata da una combinazione complessa di fattori che vanno oltre il semplice costo dell’energia. Secondo il *Vulnerable Consumer Working Group (VCWG)*, ci sono quattro fattori chiave che possono essere considerati come possibili cause della povertà energetica:

- **Caratteristiche dei mercati energetici rilevanti:** questo aspetto si riferisce alle condizioni all’interno del settore energetico. Ad esempio, prezzi finali dell’energia elevati sono un elemento cruciale, poiché le famiglie caratterizzate da basso reddito possono avere difficoltà a coprire i costi energetici per assicurarsi il comfort termico all’interno dell’edificio. La concorrenza nel settore energetico, il tipo di mercato (mercato libero o tutelato), il livello di tassazione dell’energia e i costi di trasmissione e distribuzione influenzano i prezzi finali dell’energia e possono contribuire alla povertà energetica.
- **Le caratteristiche delle famiglie:** questo aspetto riguarda le condizioni all’interno delle famiglie stesse. Il livello di reddito della famiglia è ovviamente un fattore cruciale, ma anche altri aspetti come le condizioni di salute dei membri della famiglia, il livello di istruzione, l’età dei componenti e l’accesso alle tecnologie energetiche (sistemi di

riscaldamento e/o raffrescamento efficienti) possono influenzare la capacità di una famiglia di gestire le spese energetiche.

- **Le condizioni abitative:** questo aspetto si concentra sulle caratteristiche delle abitazioni in cui le famiglie vivono. Se un'abitazione è vecchia e non efficiente dal punto di vista energetico, in termini di sistemi energetici e isolamento termico, ovviamente richiederà un consumo significativo di energia per mantenere una temperatura confortevole.

- **Condizioni di contesto socio-economico ed ambientale:** questo aspetto considera il contesto sociale in cui vivono le famiglie. Le condizioni economiche generali, l'area di residenza e altri fattori socio-economici possono avere un impatto sulla povertà energetica. Ad esempio, le famiglie in aree rurali possono avere un accesso limitato ai servizi energetici. I paesi dell'Unione Europea, tra cui l'Italia, hanno adottato una serie di interventi per combattere tale fenomeno che possono essere organizzati in due macrocategorie:

1. **Azioni per l'efficienza energetica delle abitazioni:** questi interventi includono programmi di ristrutturazione e riqualificazione energetica, che mirano a migliorare l'isolamento termico e l'efficienza degli impianti. Quindi si concentrano sulla miglioria dell'efficienza energetica nelle abitazioni al fine di ridurre i costi energetici delle famiglie.

2. **Azioni per la riduzione dei prezzi finali:** questi interventi mirano a ridurre direttamente i costi energetici delle famiglie attraverso bonus, sussidi energetici e tariffe sociali.

Nel contesto della povertà energetica, risulta chiaro come i “Contratti di Quartiere II” emergono come strumenti di notevole rilevanza per affrontare la sfida della povertà energetica, specialmente per le famiglie a basso reddito che spesso non hanno le risorse finanziarie per sostenere i costi necessari per la riqualificazione energetica, anche se tali interventi potrebbero generare un ritorno economico positivo in termini di riduzione delle bollette energetiche. Questa situazione crea una forte disparità nell'accesso agli interventi di riqualificazione energetica che porta le famiglie a basso reddito, a rimanere intrappolate in contesti di inefficienza energetica. Tali programmi mirati, quindi, contribuiscono all'agevolazione dell'efficientamento energetico delle abitazioni pubbliche, quali case popolari, ma anche alla lotta contro la povertà energetica.

La povertà energetica è un fenomeno che abbraccia diverse sfaccettature che coinvolge diversi aspetti e non solo quella economica. Le famiglie che si trovano in uno stato di povertà, oltre a non avere la disponibilità finanziaria per accedere agli interventi di efficientamento energetico, spesso sono costrette ad abitare in alloggi di scarsa qualità dal

punto di vista del comfort termoigrometrico [3][4]. Infatti, diversi studi hanno collegato la povertà energetica a un peggioramento della salute generale, della salute mentale, problemi respiratori, un aumento delle condizioni croniche con scarsa igiene e un aumento dei tassi di mortalità [5]. Gli interventi volti a migliorare l'isolamento, la ventilazione e l'efficienza energetica in generale, hanno dimostrato un'influenza positiva sulla salute delle persone coinvolte, specialmente per quanto riguarda i problemi respiratori e condizioni croniche come l'asma [6].

1.1 Comfort termico

Il benessere termoigrometrico o *thermal comfort* viene definito come “quella sensazione mentale che riflette la soddisfazione dell'individuo rispetto all'ambiente circostante” [7]. Tuttavia, tale definizione non è facilmente convertibile in parametri fisici e ciò è dovuto alla notevole variabilità nelle preferenze e nella percezione del comfort tra le persone, il che rende essenziale l'impiego di modelli basati su analisi statistiche.

Ci sono sei parametri che influenzano direttamente il comfort termico e possono essere raggruppati in due categorie: i parametri personali, che sono caratteristici degli occupanti, e i parametri ambientali, che definiscono le condizioni dell'ambiente circostante.

I parametri personali includono:

1. Tasso metabolico: rappresenta la differenza media nell'unità di tempo tra l'energia immessa (attraverso cibo, bevande, ossigeno) e l'energia espulsa. Può essere assimilato a un termine di generazione energetica e non è costante nel tempo ma dipende da diversi fattori:
 - Condizioni ambientali esterne
 - Livello di attività della persona
 - Qualità e quantità di cibo ingerito

Il tasso metabolico è espresso in met, dove 1 met corrisponde a 58 W/m^2 . Questo valore rappresenta l'energia prodotta per unità di superficie di una persona media seduta, a riposo. La superficie corporea di una persona media è circa 1.9 m^2 . ASHRAE STANDARD 55 [7] fornisce una tabella con alcuni valori di met per diversi livelli di attività svolta.

2. Resistenza termica dell'abbigliamento: la resistenza termica del vestiario, espressa in clo ($1 \text{ clo}=0.155 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) è un parametro importante per valutare quanto

efficacemente il vestiario isola il corpo umano dalle variazioni di temperatura ambientale. Valori tipici sono 0.5 clo per l'estate, 1 clo per l'inverno e 1.5 per inverno rigido.

I parametri ambientali comprendono:

1. Velocità dell'aria [m/s]
2. Temperatura dell'aria [°C]
3. Umidità relativa [%]
4. Temperatura media radiante viene definita come la "Temperatura immaginaria" di una cavità, nera e isoterma, in cui una persona scambierebbe la stessa potenza termica per radiazione come avviene nell'ambiente reale e non uniforme [°C].

Questi sei parametri sono inseriti all'interno dell'equazione di Fanger [8] che permette di identificare un indice di comfort termico globale PMV (*Predicted Mean Vote*). L'indice PMV è un parametro utilizzato per quantificare il grado di comfort termico previsto per un individuo dotato di media sensibilità, all'interno di un ambiente definito dalla combinazione dei sei parametri che prima abbiamo definito. Esso viene espresso su una scala a sette punti: -3 (molto freddo), -2 (freddo), -1 (leggermente freddo), 0 (neutro), +1 (lievemente caldo), +2 (caldo), +3 (molto caldo).

Indipendentemente dal valore dell'indice PMV (*Predicted Mean Vote*), è sempre possibile individuare una percentuale di individui che non si dichiarerebbe soddisfatta delle condizioni termiche in questione. Questa percentuale di persone insoddisfatte è comunemente indicata con l'acronimo PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) ed è calcolata in relazione all'indice PMV. Anche quando l'indice PMV raggiunge il valore neutro di zero, che rappresenta la condizione di neutralità termica, l'indice PPD assume il suo valore minimo, pari al 5%. Questo implica che anche in situazioni di neutralità termica, esiste comunque una percentuale di persone che non si ritiene soddisfatta delle condizioni termiche presenti nell'ambiente. La normativa ISO 7730 [9] definisce tre classi di comfort:

- A. $-0.2 < PMV < 0.2$
- B. $-0.5 < PMV < 0.5$
- C. $-0.7 < PMV < 0.7$

Affinché il comfort termico sia garantito, la normativa raccomanda un valore di PPD < 10%, cioè la percentuale di individui che considerano le condizioni termiche insoddisfacenti non

superi il 10%. Questa condizione corrisponde a valori di PMV compreso tra -0.5 e +0.5. In particolare, negli ambienti in cui il PMV supera +0,5, gli occupanti percepiscono l'ambiente come troppo caldo, mentre negli ambienti con un PMV inferiore a -0,5, lo percepiscono come troppo freddo.

1.2 Indoor Air Quality (IAQ)

La Direttiva europea sulla Prestazione Energetica degli Edifici (EPBD) [10] è un importante strumento giuridico che mira a promuovere l'efficienza energetica degli edifici. In questo contesto, l'EPBD riconosce l'importanza della ventilazione come aspetto cruciale nell'ottica dell'efficientamento energetico degli edifici e nel preservare la qualità dell'aria interna (IAQ) per mantenere gli ambienti salubri. La revisione dell'EPBD costituisce, quindi, un'occasione cruciale per stimolare l'adozione di sistemi e approcci innovativi capaci di ridurre il consumo energetico e migliorare la qualità dell'aria indoor.

La predominante permanenza delle persone negli ambienti chiusi, stimata intorno al 90% del tempo [9], evidenzia l'inequivocabile rilevanza della qualità dell'aria all'interno degli edifici. Questa considerazione va oltre gli ambiti residenziali, abbracciando gli spazi lavorativi, gli istituti accademici e le strutture commerciali. Pertanto, emerge con chiarezza l'importanza di studiare approfonditamente l'incidenza dell'esposizione agli inquinanti atmosferici nell'ambiente indoor; ricerche recenti riportano che il livello di contaminazione dell'aria degli ambienti indoor supera spesso quello all'esterno [11]. I risvolti sulla salute umana sono rilevanti, con impatti che spaziano dai disturbi respiratori alle malattie cardiovascolari e possono addirittura estendersi al benessere mentale. In aggiunta, le conseguenze si ripercuotono sulla produttività e sulla qualità della vita all'interno dei luoghi di lavoro e degli istituti educativi [12]. Sebbene la maggior parte delle pubblicazioni si sia principalmente concentrata sull'ambiente esterno, gli studi sull'ambiente indoor hanno iniziato ad assumere una maggiore rilevanza negli ultimi anni [13]. In questo contesto, è imperativo che la ricerca prosegua sull'analisi della qualità dell'aria negli ambienti chiusi, e che sia promossa un'adozione diffusa di strategie atte a migliorarla, quali l'implementazione di sistemi di ventilazione adeguati, la riduzione delle fonti di inquinamento interno e un costante monitoraggio.

1.2.1 Normativa europea EN 16798-1

La normativa europea EN 16798-1 [14] utilizza la concentrazione di CO₂ come indicatore della qualità dell'aria interna e definisce quattro categorie di qualità dell'ambiente indoor. Essa può essere utilizzata sia per determinare i tassi di ricambio d'aria di progetto per i sistemi di ventilazione (meccanica e naturali). Il tasso di ventilazione viene calcolato con un bilancio di massa in regime stazionario necessario per diluire una certa sostanza e le quattro categorie sono identificate da quattro valori di ΔCO_2 (differenza tra concentrazione interna ed esterna), assumendo un tasso di generazione di 20 L/h per persona in condizioni sedentarie.

Tabella 1 - Categorie di IAQ in funzione del ΔCO_2 [ppm] [14].

CATEGORIA	ΔCO_2 [ppm]	Q [L/s px]
I	550	10
II	800	7
III	1350	4
IV	1350	4

I valori di ΔCO_2 fanno riferimento a persone “non-adattate”, ossia occupanti che sono sensibili a tutti i contaminanti nell'aria poiché la loro presenza nell'ambiente è discontinua. Ad ogni categoria corrisponde una portata d'aria di rinnovo, per numero di occupanti, necessaria per la diluizione della CO₂ [14]. Si può vedere che la portata minima proposta dalla normativa (Tab.1) è di 4 L/s per persona, mentre il valore ottimale è quello corrispondente alla categoria I. Tuttavia, la categoria II è considerata accettabile

1.3 Sistemi di ventilazione e raffrescamento passivo

I sistemi di ventilazione rivestono un ruolo fondamentale nella gestione della qualità dell'aria (IAQ), ancor di più nel contesto delle nuove abitazioni a basso consumo energetico, conformi alle direttive nazionali, caratterizzate da un elevato grado di isolamento al fine di limitare gli scambi termici e le dispersioni per ventilazione. In questa tipologia di edifici, è

importante adottare soluzioni impiantistiche che assicurino un'elevata qualità dell'aria senza compromettere l'efficienza energetica attraverso l'apertura di finestre.

In passato, negli edifici residenziali la ventilazione era spesso un processo involontario, dovuto alla scarsa tenuta degli infissi, ma rivestiva un ruolo fondamentale nel ricambio d'aria.

Esistono diversi modi per garantire il ricambio d'aria all'interno di un edificio:

- 1) **Infiltrazione e aerazione:** questi metodi non richiedono progettazione e si basano sull'apertura di infissi.
- 2) **Ventilazione naturale:** sfrutta il vento e la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno come forze motrici naturali per generare un flusso d'aria attraverso l'edificio. Questo metodo richiede una progettazione adeguata a differenza del primo metodo. Questo processo inizia con un'analisi dettagliata del sito e l'orientamento strategico dell'edificio per massimizzare la cattura del vento dominante. Le aperture come finestre, bocchette e lucernari vengono posizionate in modo strategico da consentire l'ingresso dell'aria fresca e favorire la circolazione dell'aria.
- 3) **Ventilazione meccanica:** implica l'uso di una rete di condotte attraverso la quale l'aria viene spinta forzatamente attraverso l'uso di ventilatori. Essi sono permesse di avere un controllo maggiore sul flusso d'aria e sono in grado di fornire un ricambio d'aria costante e controllato. Possono essere a doppio flusso o singolo flusso, a seconda del numero dei ventilatori e condotte.

La normativa UNI EN 16798 [14] sottolinea l'importanza di mantenere una ventilazione continuativa all'interno dell'edificio quando occupato, consentendo una riduzione quando non vi sono persone presenti, ma con l'obbligo di mantenere sempre un minimo livello di ventilazione, che non può mai essere eliminato.

1.3.1 Ventilazione naturale

La ventilazione naturale è finalizzata al controllo della qualità dell'aria e al raggiungimento del comfort termico. Questo approccio si avvale dell'interazione tra l'edificio e l'ambiente esterno al fine di promuovere il movimento dell'aria all'interno attraverso finestre, porte o particolari aperture, quali bocchette, camini solari o lucernari. Tuttavia, la sua efficacia è fortemente influenzata dalle condizioni climatiche, le quali sono caratterizzate da forte variabilità. In contesti caratterizzati da elevate temperature massime, come molte città

italiane durante la stagione estiva, la ventilazione naturale può rivelarsi efficace solo di notte o nelle prime ore del giorno, quando le temperature esterne sono più basse. Questo potrebbe limitarne l'applicabilità come soluzione esclusiva per il comfort termico ma può, al contempo, fungere da complemento ai sistemi di condizionamento, riducendo la necessità di utilizzarli e contribuendo al risparmio energetico. Questa prospettiva è supportata dalla ricerca condotta da He et al. (2017) [12], che dimostra come la ventilazione naturale rappresenti un efficace strumento per migliorare il comfort termico, soprattutto in regioni caratterizzate da estati calde e umide. Questo approccio assume un'importanza cruciale poiché aiuta a mantenere bassi i consumi energetici legati al raffrescamento, promuovendo una maggiore sostenibilità energetica degli edifici. Allo stesso tempo, un altro studio condotto da Gil-Baez et al. (2021) [16] ha analizzato la qualità dell'aria interna nelle scuole situate in regioni mediterranee e ha rivelato che la ventilazione naturale è in grado di garantire condizioni di qualità dell'aria accettabili e salutarie [13].

1.3.1.1 Meccanismi di ventilazione naturale

Le due principali forze motrici della ventilazione naturale sono il gradiente termico e il gradiente anemologico. Il gradiente termico si verifica a causa delle differenze di temperatura tra l'interno e l'esterno dell'edificio. Questa differenza di temperatura induce la circolazione dell'aria, poiché l'aria calda tende a salire e fuoriuscire dall'edificio richiamando l'aria fresca attraverso le aperture. Tale differenza di densità, indotta dalla differenza di temperatura, congiunta a uno sviluppo verticale degli edifici, quali possono essere i Duplex (edifici su due piani), porta ad una differenza di pressione tra le diverse zone termiche poste a differenti altezze, promuovendo quindi un flusso d'aria ascensionale (*stack ventilation*). Tali flussi d'aria vengono poi espulsi verso l'esterno attraverso aperture ricavate sulle coperture orizzontali in sommità, come lucernari e camini solari.

Il gradiente anemologico, invece, è legato al vento; quando il vento soffia contro un edificio, crea una pressione differenziale, poiché la facciata esposta al vento sarà soggetta ad una sovrappressione mentre la facciata opposta ad una depressione, che può forzare l'aria a entrare o uscire dalle aperture, contribuendo così alla ventilazione naturale. Questo tipo di ventilazione viene chiamata *cross ventilation*.

1.3.1.2 Camino solare

Il camino solare, fondamentalmente, è un sistema, basato sulla convezione naturale, che sfrutta l'energia solare per indurre un moto ascensionale dell'aria, promuovendo un movimento dell'aria all'interno dell'edificio. Infatti, come sappiamo, la densità dell'aria diminuisce all'aumentare della temperatura e quindi l'aria calda viene spinta verso l'alto a causa del *buoyancy effect*.

Siccome l'aria è un fluido trasparente alla radiazione solare, non può essere riscaldata direttamente da essa. Quindi, un camino solare è dotato di un collettore solare, realizzato con un materiale capace di assorbire la radiazione solare, che trasferisce il calore all'aria circostante mediante convezione.

La configurazione più comune prevede una parte esterna realizzata con materiale vetroso che trasmette la radiazione solare nelle basse lunghezze d'onda ed opaca per le lunghezze d'onda nell'infrarosso emesse dall'assorbitore, che è posizionato internamente (Fig.1). La luce solare penetra attraverso il vetro, riscalda l'assorbitore solare, il quale a sua volta riscalda l'aria all'interno del camino. Il calore accumulato nell'aria provoca un aumento della temperatura e, di conseguenza, una diminuzione della densità che tende a salire verso l'alto grazie alla forza di galleggiamento, generando un flusso ascendente. Questo flusso d'aria può essere sfruttato, appunto, per la ventilazione naturale in quanto l'aria calda del camino crea una depressione, richiamando aria fresca dall'esterno attraverso finestre o bocchette.

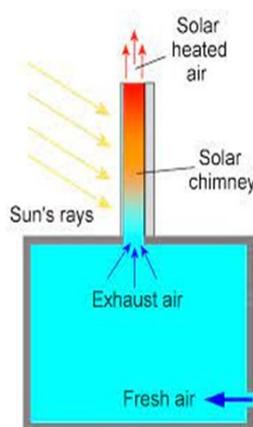


Figura 1 - Principio di funzionamento del camino solare

Negli ultimi anni, sono stati condotti numerosi studi sulle prestazioni dei sistemi di ventilazione naturale. Khedari et al. (2000) [15] hanno dimostrato come la ventilazione naturale ottenuta tramite un camino solare possa ridurre i consumi estivi in climi caldi, basandosi sull'analisi dei consumi elettrici dei condizionatori. Villar-Ramos (2020) [17] ha condotto uno studio sulle prestazioni termiche di un camino solare a canale singolo in un clima umido e caldo. I risultati di questa ricerca mostrano che il camino solare può essere efficacemente utilizzato come sistema di ventilazione passiva, in grado di garantire un tasso massimo di ricambio dell'aria di 27.11 h⁻¹ e un'efficienza massima di 88.9%. Thateenaranon et al. [18] hanno condotto uno studio in cui è stato evidenziato che l'installazione di un camino solare in edifici caratterizzati da una progettazione bioclimatica ha comportato miglioramenti significativi nelle condizioni termiche dell'ambiente interno, oltre a portare vantaggi rilevanti in termini di illuminazione.

1.3.2 Ventilazione Meccanica

I sistemi di ventilazione meccanica possono essere di due tipi:

- A singolo flusso
- A doppio flusso

Nei sistemi a singolo flusso è presente un unico ventilatore che estrae l'aria viziata dall'edificio e la espelle verso l'esterno, creando una depressione all'interno che richiama aria fresca dall'esterno attraverso delle bocchette installate nelle zone nobili, come soggiorno e camere. I sistemi a doppio flusso, presentano due ventilatori separati: uno per l'estrazione dell'aria viziata e uno per l'immissione dell'aria fresca. Quest'ultimo permette di pretrattare l'aria prima dell'immissione in ambiente, in termini di qualità, temperatura e umidità, e permette l'installazione di recuperatori di calore.

In un recente studio sulla qualità dell'aria indoor in nuovi edifici residenziali in Corea [19], dotati di sistemi di ventilazione diversi (ventilazione meccanica e naturale), è emerso che la ventilazione meccanica contribuisce in modo significativo a ridurre le concentrazioni di PM_{2.5} e CO₂ rispetto alla ventilazione naturale. Negli appartamenti con ventilazione meccanica, si è osservata una diminuzione del 26% nei rapporti tra le concentrazioni interne ed esterne per le particelle submicrometriche, e una riduzione del 65% per le particelle più grandi, se paragonati alla ventilazione naturale.

Uno studio condotto da Evangelos Grigoropoulos et al. [20] ha esaminato l'effetto di diverse strategie di ventilazione durante la stagione estiva in edifici situati nella regione mediterranea. Nello scenario base, si è adottato un utilizzo moderato della ventilazione naturale, mentre in seguito sono state simulate situazioni con un graduale aumento del tasso di ventilazione e l'introduzione della ventilazione meccanica. I risultati hanno evidenziato un aumento del 20% nella domanda di energia nel caso della ventilazione meccanica, nonostante un miglior controllo della temperatura interna degli edifici. Tuttavia, è importante sottolineare che la ventilazione naturale risulta più vantaggiosa per gli edifici situati in zone mediterranee, anche se offre un controllo termico interno inferiore.

Al contrario, uno studio sperimentale condotto da Maas [21] non ha rilevato differenze significative tra la ventilazione meccanica e quella naturale riguardo alla percezione degli occupanti in una sala seminari. Nel contesto del comfort termico e dell'efficienza energetica, è degno di nota che, nonostante la priorità degli inquilini sia il comfort termico, essi sono disposti a spendere di più in energia elettrica per sfruttare appieno i benefici di un sistema di ventilazione meccanica al fine di godere di ambienti più salubri [22].

1.3.3 Sistemi per il raffrescamento passivo: Tetto verde

I tetti verdi sono dei sistemi di copertura degli edifici in cui una parte o l'intera superficie viene rivestita da vegetazione coltivata su un substrato appropriato, sopra una membrana impermeabile.

Generalmente esistono due tipologie di tetti verdi:

- **ESTENSIVI:** è la soluzione più semplice, economica e diffusa. Si utilizzano specie vegetali che richiedono poca acqua e concimazione, quindi bassa manutenzione.
- **INTENSIVI:** questa tipologia è più complessa e richiede una manutenzione più frequente, quindi più costosa. La vegetazione è costituita da una vasta gamma di piante, compresi fiori, arbusti e talvolta anche alberi. Tuttavia, richiedono un substrato più spesso e, spesso, sistemi di irrigazione automatici per garantire che le piante ricevano abbastanza acqua.

Essi sono costituiti da una serie di strati sovrapposti, ognuno con una funzione specifica:

- 1) **Membrana impermeabile:** posizionato direttamente sopra la superficie del tetto dell'edificio per impedire la penetrazione dell'acqua nella struttura edilizia sottostante. Solitamente si usano membrane bituminose, in PVC o in EPDM.

- 2) **Barriera radicale:** è uno strato solitamente opzionale e viene utilizzato per impedire alle radici delle piante di penetrare nella membrana impermeabile. Solitamente viene utilizzato nei tetti verdi intensivi, dove possono essere previsti alberi o arbusti con radici profonde.
- 3) **Strato di drenaggio:** favorisce il deflusso dell'acqua in eccesso ed evitare il ristagno.
- 4) **Substrato di crescita:** rappresenta il terreno in cui cresceranno le piante.
- 5) **Vegetazione:** è lo strato superiore costituito dalle piante coltivate

Negli ultimi anni, hanno ricevuto una crescente popolarità, dovuta ad una serie di benefici energetici, ma anche ambientali, che essi possono offrire. Uno dei principali vantaggi consiste nella capacità di trattenere l'acqua piovana, riducendo il rischio di allagamenti. Infatti, l'acqua viene assorbita dal substrato e trattenuta nelle piante, andando a ritardare il picco di flusso delle acque piovane, alleviando così il carico sui sistemi di canalizzazione delle stesse [23]. Ovviamente la loro efficacia dipende dallo spessore del substrato, tipo di vegetazione e intensità delle precipitazioni.

Oltre alla gestione delle acque, i tetti verdi offrono anche vantaggi termici contribuendo a ridurre i consumi energetici degli edifici [24]. Uno studio condotto in Grecia ha dimostrato che i tetti verdi, in base alla tipologia, possono ridurre il consumo energetico per il raffrescamento dal 2% al 48% durante la stagione estiva, con conseguente riduzione della temperatura interna fino a 4°C [25].

Questo miglioramento è dovuto all'ombreggiatura fornita dalla vegetazione, un miglior isolamento grazie allo spessore aggiuntivo che apporta e all'inerzia termica complessiva della struttura, la quale aumenta quando piove grazie al contributo della massa d'acqua raccolta. Inoltre, offrono una capacità di raffrescamento dovuto all'evapotraspirazione: le piante dei tetti verdi assorbono l'acqua dal substrato e la rilasciano nell'ambiente attraverso la traspirazione. Questo processo, ovviamente, richiede energia sotto forma di calore, che viene prelevata dall'aria circostante, raffreddandola.

Essi permettono anche di mitigare l'effetto "isola di calore", un fenomeno comune nelle aree urbane in cui le temperature locali risultano essere più elevate rispetto alle zone circostanti [26]. Berardu et al.[27] hanno evidenziato che i tetti verdi, grazie alla loro vegetazione, hanno un valore di albedo compreso tra 0.7 e 0.85, quindi notevolmente più alto dei tetti tradizionali che hanno un valore di albedo compreso tra 0.1 e 0.2. Questa differenza di albedo è significativa poiché indica che essi riflettono una maggiore quantità di radiazione solare,

riducendo di fatto l'assorbimento della stessa e contribuendo a contenere la temperatura dell'ambiente circostante.

Capitolo 2

Edifici sperimentali di edilizia sovvenzionata a Vigonza: un caso studio

Il presente caso di studio si occupa di un complesso di edifici di edilizia sovvenzionata, collocato all'interno del contesto del centro di Vigonza, in un'area che, prima dell'intervento, non era urbanizzata. La realizzazione di questi edifici è stata resa possibile grazie all'impegno finanziario del Comune di Vigonza all'interno del programma "Contratti di Quartiere II".



Figura 2 - Vista aerea del complesso edilizio

Il complesso edilizio consiste di cinque blocchi, ciascun costituito da sei appartamenti, per un totale di trenta unità abitative. La disposizione interna degli appartamenti è la medesima

per ogni blocco edilizio. Al piano terra si trovano due unità abitative, le altre quattro, disposte a coppie, sono degli appartamenti duplex che si sviluppano tra il primo e il secondo piano. Le unità abitative al piano terra godono dell'accesso a un giardino di dimensioni ridotte, orientato a sud. Gli appartamenti duplex ai lati dispongono di un accesso esclusivo al tetto verde situato tramite una scala.

Nel caso degli appartamenti duplex centrali, questi sono dotati di una terrazza coperta con pergola, cui si accede dal soggiorno al primo piano.

I dati tecnici e costruttivi degli alloggi oggetto di analisi e delle relative strutture sono stati ricavati direttamente dalla Legge 10¹. La tabella seguente (Tab. 2) riporta le caratteristiche geometriche di sei appartamenti appartenenti ad un blocco del complesso edilizio in esame. Le unità abitative degli altri blocchi sono identiche.

Tabella 2 - Caratteristiche geometriche di sei alloggi appartenenti al blocco edilizio C

Appartamento	Blocco	V	S	S_u
		[m ³]	[m ²]	[m ²]
5A	C	175.959	217.69	65.17
6A	C	176.823	217.73	65.49
19D	C	268.542	262.10	99.46
20E	C	197.235	244.40	73.05
21E	C	197.235	244.40	73.05
22C	C	269.757	262.10	99.91

Dove:

- V è il volume delle parti di edificio abitabili o agibili al lordo delle strutture che li delimitano;
- S è la superficie esterna che delimita il volume;
- S_u è la superficie utile dell'edificio.

¹ Documento tecnico obbligatorio per la realizzazione di nuovi edifici e per la riqualificazione energetica di edifici esistenti, redatta in conformità agli schemi di riferimento specifici stabiliti nel DM 26/6/2015, che stabilisce i requisiti minimi che devono essere garantiti per il contenere il consumo energetico.

Al fine di fornire una comprensione visuale più completa e dettagliata delle caratteristiche geometriche della disposizione degli alloggi, si riportano le immagini del prospetto nord (Fig.3) e sud (Fig.4).



Figura 3 - Vista prospetto Nord



Figura 4 - Vista prospetto Sud

2.1 Caratteristiche dell'involucro

L'involucro edilizio svolge un ruolo fondamentale nel controllo dell'interazione con gli agenti esterni, come il sole, l'acqua, la vegetazione e la ventilazione, e funge da interfaccia sia passiva che attiva tra gli alloggi e l'ambiente esterno. Esso è progettato per adattarsi alle diverse stagioni e alle condizioni di insolazione grazie ai suoi elementi variabili e fissi.

Un elemento cruciale dell'involucro edilizio è la stratigrafia delle pareti esterne verticali. Questa comprende una muratura interna in laterizio, che fornisce una massa termica importante per garantire l'inerzia termica necessaria soprattutto durante la stagione estiva, ed una protezione termica esterna attraverso l'uso di lastre in Polistirene Espanso Sinterizzato (EPS) in grafite con uno spessore di 14 cm, protetti da una parete ventilata composta da lastre piane silico-calcaree rinforzate con fibre mineralizzate.

Un aspetto importante è il rigido controllo dei ponti termici, che sono stati adeguatamente isolati con l'uso diffuso di vetro cellulare alla base delle murature e per questo motivo non sono stati inseriti all'interno del modello Trnsys in quanto il loro impatto risulta essere minimo. Anche le superfici di copertura sono state progettate con un'attenzione particolare all'inerzia termica, utilizzando strati coibentati di notevole spessore. Inoltre, la maggior parte degli ambienti situati al livello superiore dispongono di tetti verdi, che rappresentano l'elemento variabile dell'involucro, e contribuiscono al controllo termico dell'edificio offrendo benefici aggiuntivi in termini di sostenibilità ambientale.

Di seguito, vengono elencati i componenti che costituiscono l'involucro edilizio e gli elementi di separazione tra le diverse zone termiche, concentrandoci esclusivamente sull'appartamento **6A**, che sarà oggetto di analisi nella seconda parte della tesi per la creazione del modello energetico di simulazione.

Tabella 3 - Porta d'ingresso

N.	Descrizione strato	s	λ	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0.130	-	-	-
1	Policloruro di vinile (PVC)	3	0.17	0.018	1390	0.9	50000
2	Acciaio	2	52	0	7800	0.45	9999999
3	Poliuretano espanso in continuo in lastre	15	0.032	0.469	30	1.3	140
4	Intercapedine non ventilata $Av < 500 \text{ mm}^2 / \text{m}$	20	0.1143	0.175	-	-	-
5	Poliuretano espanso in continuo in lastre	15	0.032	0.469	30	1.3	140
6	Acciaio	2	52	0	7800	0.45	9999999
7	Policloruro di vinile (PVC)	3	0.17				
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0.03	-	-	-

Tabella 4 - Pavimento

N.	Descrizione strato	s	λ	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0.170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10	1.3	0.008	2300	0.84	9999999
2	Caldana additivata per pannelli	50	1	0.05	1800	0.88	30
3	Tube del pannello – H50	0	-	-	-	-	-
4	Poliuretano espanso in discontinuo in lastre	30	0.0340	0.862	50	1.3	140
5	Poliuretano espanso in continuo in lastre	20	0.032	0.625	40	1.3	140
6	CLS di argilla espansa pareti interne a struttura (um. 4%)	60	0.16	0.375	500	1	7
7	Solai int. Laterizio	250	1.6	0.156	1800	0.84	13
8	Malta di calce o di calce e cemento	10	0.9	0.011	1800	1	22
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0.170	-	-	-

Tabella 5 - Soffitto

N.	Descrizione strato	s	λ	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0.170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10	1.3	0.008	2300	0.84	9999999
2	Caldana additivata per pannelli	50	1	0.05	1800	0.88	30
3	Tubo del pannello – H50	0	-	-	-	-	-
4	Poliuretano espanso in discontinuo in lastre	30	0.0340	0.862	50	1.3	140
5	Poliuretano espanso in continuo in lastre	20	0.032	0.625	40	1.3	140
6	CLS di argilla espansa pareti interne a struttura (um. 4%)	60	0.16	0.375	500	1	7
7	Solai int. Laterizio	250	1.6	0.156	1800	0.84	13
8	Malta di calce o di calce e cemento	10	0.9	0.011	1800	1	22
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0.170	-	-	-

Tabella 6 - Muro perimetrale

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0.130	-	-	-
1	Malta di calce o di calce e cemento	15	0.9	0.022	1800	1	22
2	20 – 30 – 19	200	0.273	0.733	660	1	5
3	Dark8 DT	140	0.03	4.667	15	1.45	20
4	Intonaco plastico per cappotto	15	0.3	0.033	1300	0.84	30
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0.030	-	-	-

Tabella 7 - Muro divisorio interno da 10 cm.

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0.130	-	-	-
1	Malta di calce o di calce e cemento	15	0.9	0.022	1800	1	22
2	Mattone forato	80	0.4	0.2	775	0.84	9
3	Malta di calce o di calce e cemento	10	0.9	0.011	1800	1	22
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0.030	-	-	-

Tabella 8 - Muro divisorio con le altre unità

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0.130	-	-	-
1	Malta di calce o di calce e cemento	10	0.9	0.011	1800	1	22
2	Mattone forato	80	0.4	0.2	775	0.84	9
3	Intercapedine non ventilata $A_v < 500 \text{ mm}^2/\text{m}$	20	0.1143	0.175	-	-	-
4	Pannello in lana di vetro	60	0.031	1.935	70	1.03	1
5	Mattone forato	120	0.387	0.31	717	0.84	9
3	Malta di calce o di calce e cemento	10	0.9	0.011	1800	1	22
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0.130	-	-	-

Si riportano i valori finali di trasmittanza termica U e gli spessori delle diverse strutture orizzontali e verticali precedentemente descritti:

Tabella 9 - Valori finali di trasmittanza termica U e spessori delle diverse strutture orizzontali e verticali

DESCRIZIONE	Trasmittanza U [W/(m ² K)]	Spessore [mm]
MURO PERIMETRALE P.0 e P1.2	0.178	370
MURO DIVISORIO INTERNO	2.074	100
MURO DIVISORIO – ALTRA UNITA’	0.344	300
PAVIMENTO DIVISORIO – GARAGE	0.354	520
PAVIMENTO DIVISORIO	0.409	430
SOFFITTO DIVISORIO	0.433	430
TERRAZZA	0.245	481

Dove:

- s spessore [mm]
- λ Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi [W/(mK)]
- M.V. Massa Volumica [Kg/m³]
- C.T. Capacità termica specifica [kJ/kgK]

- R.V. Fattore di resistenza alla diffusione del vapore [-].

Per quanto riguarda i componenti finestrati, si riportano solamente le caratteristiche termiche:

Tabella 10 - Caratteristiche termiche degli elementi trasparenti

DIMENSIONI	Trasmittanza infisso [W/(m² K)]	Trasmittanza vetro [W/(m² K)]
150x40	1.431	1.108
100x210	1.208	1.108
180x160	1.233	1.108
275x210	1.212	1.108

2.2 Sistemi presenti all'interno degli alloggi

Nell'ambito dell'intervento gli edifici in oggetto sono dotati di una serie di impianti in grado di fornire comfort, benessere climatico e rispetto della normativa vigente.

Per questo l'architettura impiantistica prevede un sistema di produzione di energia da fonte rinnovabile attraverso l'utilizzo di una pompa di calore aria/acqua da 7 kW e 9 kW termici, rispettivamente per gli appartamenti al piano terra, di superficie più ridotta, e gli appartamenti duplex.

Questo schema impiantistico permette il rispetto del D.Lgs. 28/2011 [28], il quale stabilisce che gli edifici di nuova costruzione e sottoposti a ristrutturazioni importanti devono coprire una quota minima del proprio fabbisogno energetico con fonti rinnovabili. Il decreto obbliga la copertura del 35% del totale fabbisogno di energia attraverso fonte rinnovabile di energia e il 50% del totale fabbisogno di energia per la produzione di ACS.

La pompa di calore è dotata di un controllo a inverter che permette di inseguire il carico termico dell'edificio, evitando eccessivi cicli on-off della macchina. Il sistema viene controllato attraverso da un microcomputer installato all'interno dell'unità interna, il quale, impone la frequenza al compressore esterno sulla base della temperatura esterna della temperatura dell'acqua di mandata impostata.

La temperatura di mandata dell'acqua può essere gestita in due modi: attraverso una curva climatica, dove la temperatura di mandata varia in funzione della temperatura esterna, o temperatura fissa, scelta dall'utente.

Per quanto riguarda il funzionamento in modalità di riscaldamento è la seguente:

- Se la temperatura esterna supera la temperatura di spegnimento termico impostata dall'utente di almeno 3°C, la pompa di calore interrompe il funzionamento in modalità riscaldamento.
- La pompa di calore verrà riattivata quando la temperatura esterna scende di almeno 1°C al di sotto della temperatura di spegnimento termico impostata dall'utente.

2.2.2 Pavimento radiante

Il sistema di riscaldamento a pavimento radiante installato all'interno degli edifici è composto da un pannello isolante costituito in polistirene espanso di 50 cm, rivestito con una guaina alluminata che presenta linee guida per la corretta posa della tubazione. Sopra l'isolante è presente la caldana additivata di 50 cm al fine di migliorare la distribuzione del calore, in modo tale che il riscaldamento sia più uniforme ed efficiente.

La tubazione è realizzata in polietilene PE-RT di tipo II, dotata di una barriera di protezione per il passaggio dell'ossigeno in modo tale da assicurare una lunga durata operativa (UNI EN 1264-4 [30]). I tubi presentano un diametro esterno di 20 mm e uno spessore di 2 mm, in accordo con la normativa UNI EN 1264-4.

Per quanto riguarda il passo tra i tubi, non sono state fornite informazioni in Legge 10, quindi si è scelto un valore pari a 20 cm in modo tale da mantenere la lunghezza massima di ciascun anello pari a 120m (UNI EN 1264-4), oltre al fatto che un valore di passo inferiore è più adatta per ambienti in cui le potenze specifiche richieste siano elevate, mentre le case popolari analizzate sono edifici altamente isolati.

2.2.3 Il sistema di ventilazione meccanica

In risposta all'obiettivo di ridurre al minimo le dispersioni di calore, gli alloggi appartenenti all'ambito dell'edilizia sovvenzionata adottano strategie costruttive mirate. Queste includono l'impiego di un elevato grado di isolamento termico dell'involucro esterno al fine di limitare gli scambi termici e quindi le dispersioni termiche. In parallelo, sono stati installati infissi (porte e finestre), caratterizzati da vetrocamere ad alto isolamento e telai in materiale isolante dotati di guarnizioni e battute multiple al fine di prevenire il passaggio d'aria attraverso fessure o aperture, limitando quindi le dispersioni termiche dovute alle infiltrazioni.

L'adozione congiunta di queste due soluzioni permette di conseguire un significativo decremento degli scambi termici tra gli ambienti interni ed esterni. Ciò ha permesso di minimizzare le dispersioni termiche durante la stagione invernale e, congiuntamente, prevenire il riscaldamento delle pareti e l'ingresso di aria calda nei mesi estivi.

Tuttavia, l'adozione di un involucro altamente impermeabile all'aria solleva questioni rilevanti riguardo alla qualità dell'aria interna dell'edificio. Infatti, il ricambio d'aria necessario alla rimozione di agenti inquinanti, quali l'anidride carbonica generata dagli occupanti, i residui di cottura, possibili tracce di fumo e umidità, che prima era garantito dalla permeabilità di porte e finestre, risulta ora ostacolato dall'alto grado di tenuta alle infiltrazioni dell'involucro.

Nel contesto di edifici a basso consumo energetico, è quindi essenziale adottare soluzioni impiantistiche che garantiscano un elevato livello di *indoor air quality* senza compromettere l'efficienza energetica complessiva dell'edificio.

La tradizionale aerazione degli ambienti, intesa come apertura delle finestre per brevi intervalli di tempo, è un'operazione energeticamente dispendiosa che può compromettere gli sforzi volti a contenere i consumi energetici. Da questo punto di vista, i sistemi di ventilazione meccanica possono garantire adeguati tassi di ricambio dell'aria interna senza necessità di intervenire sull'apertura delle finestre.

Nel caso studio di Vigonza, in tutti gli alloggi del piano terra dei singoli blocchi edilizi sono previsti due tipologie di impianto di ventilazione meccanica:

1. A singolo flusso (TIPO A)
2. A doppio flusso con recuperatore (TIPO B)



Figura 6 - Disposizione impianti di ventilazione meccanica al piano terra dei singoli Blocchi

2.2.3.1 Sistema di ventilazione meccanica a singolo flusso (TIPO A)

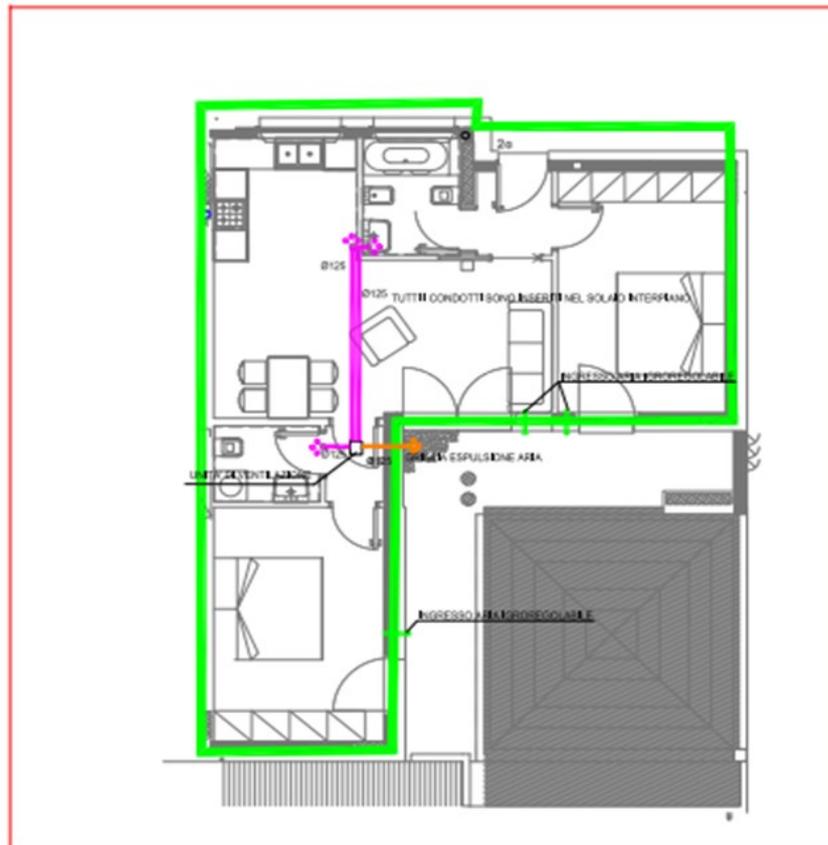
I sistemi di ventilazione meccanica a singolo flusso, installati in otto unità abitative al piano terra, prevedono un unico flusso d'aria forzata estratta dai, quali bagni e la cucina, attraverso l'uso di cappe di aspirazione ed estrattori. L'immissione dell'aria fresca, invece, è realizzata nei locali dove si richiede una maggiore purezza dell'aria ("locali nobili"), cioè nelle camere da letto e nel soggiorno, ed è realizzata attraverso l'installazione di bocchette igroregolabili. Queste bocchette sono autoregolanti e sono in grado di variare la sezione di passaggio, grazie a un elemento igroscopico, in funzione del livello di umidità relativa del locale.

L'aria aspirata dalle singole zone viene convogliata all'esterno da un ventilatore cassonato posto nel controsoffitto del piccolo disimpegno davanti al locale bagno. Il sistema di aspirazione è costituito da un insieme di canalizzazioni circolari flessibili fonoassorbenti di diametro pari a 125 mm, posizionate all'interno del solaio prima della fase di getto.

Questa semplicità operativa ed economicità, tuttavia, presenta una serie di limiti:

- Non è possibile avere un controllo completo dell'aria immessa in ambiente;
- Non è possibile installare un recuperatore di calore, che consentirebbe di pretrattare l'aria esterna prima dell'ingresso in ambiente. Ciò può portare a dispersioni termiche durante l'inverno a causa dell'immissione di aria fredda e a un aumento di temperatura interna durante l'estate quando l'aria immessa è più calda.

- Non sono in grado di garantire un'adeguata qualità dell'aria introdotta, in quanto non è possibile installare filtri. Questo può rappresentare una criticità soprattutto nelle aree con elevati livelli di inquinamento.



IMPIANTO DI VENTILAZIONE MECCANICA DI TIPO "A"

Figura 7 - Impianto di ventilazione meccanica di tipo "A"

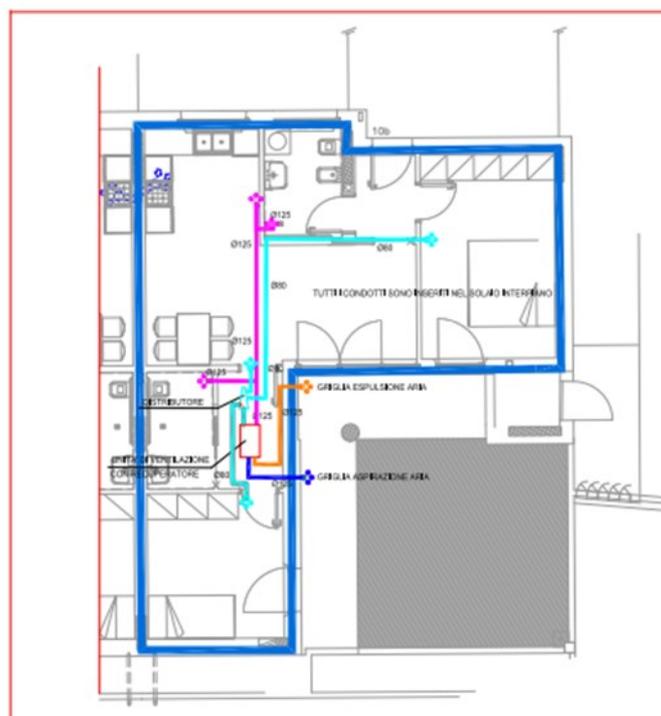
2.2.3.2 Sistema di ventilazione meccanica a doppio flusso con recuperatore statico (TIPO B)

Il sistema a doppio flusso consente di controllare sia l'estrazione che l'immissione di aria all'interno dell'edificio. Infatti, l'estrazione dell'aria viziata avviene tramite un impianto centralizzato che aspira l'aria viziata dalla cucina e dai servizi igienici; l'immissione di aria fresca è invece garantita da un ventilatore di immissione che preleva l'aria dall'esterno e la distribuisce nelle camere da letto e nel soggiorno.

L'elemento centrale di questo sistema è il recuperatore di calore statico a piastre in tecnopolimero, che permette di recuperare parte dell'energia termica dell'aria viziata in uscita andando a riscaldare quella in ingresso in inverno. Nel contesto estivo, il recuperatore

di calore offre la possibilità di raffreddare l'aria in ingresso durante il processo di ricambio. Tuttavia, nel nostro specifico scenario, in cui non disponiamo di sistemi di raffrescamento in grado di mantenere la temperatura interna a 26/26°C, sorge la necessità di valutare l'efficacia del recuperatore di calore

Ovviamente i benefici sono maggiormente apprezzabili durante la stagione invernale, quando la differenza di temperatura tra interno ed esterno è elevata. Infatti, considerando una temperatura esterna di progetto di -5 °C e una temperatura interna di comfort di 20 °C, la differenza di temperatura tra interno ed esterno è piuttosto importante e questo permette di recuperare una quantità significativa di energia termica dall'aria viziata in uscita, con importanti risparmi energetici. Inoltre, l'aria esterna presenta un'umidità specifica che è piuttosto bassa e quindi miscelandosi con l'aria degli ambienti porta ad una riduzione dell'umidità interna. In estate, invece, assumendo una temperatura esterna di progetto di 35 °C e una interna di comfort di 26 °C, la differenza risulta essere di solo 9°C. Di conseguenza, il raffrescamento dell'aria immessa tramite quella più fresca espulsa risulta meno rilevante. Il sistema richiede una manutenzione minima, il consumo elettrico dell'estrattore è trascurabile e i livelli sonori di funzionamento sono impercettibili.



IMPIANTO DI VENTILAZIONE MECCANICA DI TIPO "B"

Figura 8 - Impianto di ventilazione meccanica a doppio flusso

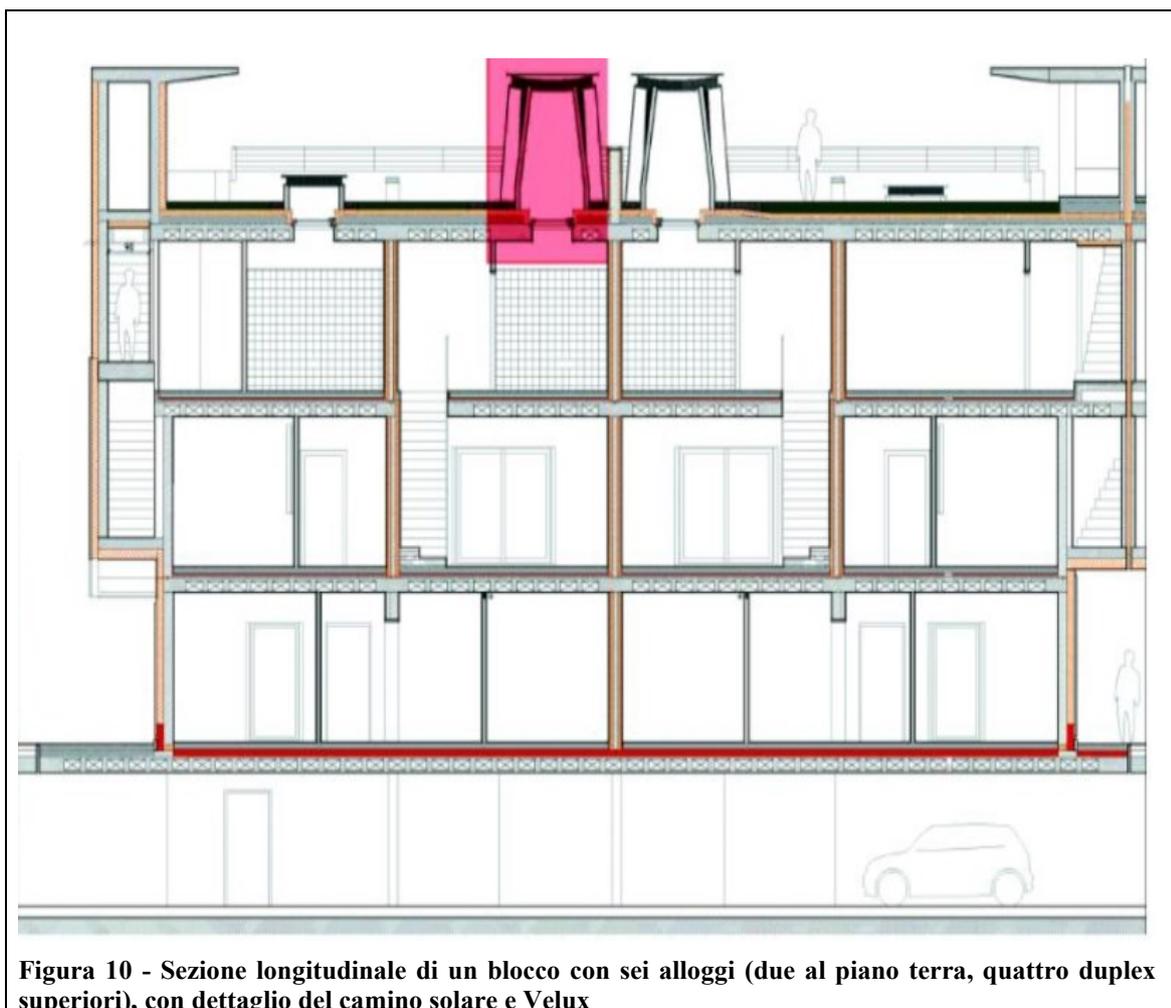
2.2.4 Ventilazione naturale

A differenza degli alloggi al piano terra, gli alloggi duplex ai piani superiori si affidano a sistemi di ventilazione naturale. Tali appartamenti sono dotati di apposite bocchette igrometriche di prelievo dell'aria fresca posizionate sulla facciata nord al primo piano in zona cucina, mentre, al secondo piano, sono installate sulla parete sud, nel disimpegno.

Gli alloggi duplex laterali hanno l'accesso esclusivo al tetto verde. In ciascun di essi, il flusso ascendente dell'aria viene garantito dalla presenza del vano scala che collega i piani inferiori a quelli superiori. Questo flusso favorisce la refrigerazione notturna della massa interna dell'edificio, contribuendo a ridurre la temperatura interna. Il flusso ascendente, dopo essere transitato nel vano scala, esce in copertura attraverso il velux, ovvero un lucernario posizionato nel bagno al secondo piano, e il terminale della scala, che porta al tetto verde. Negli alloggi duplex centrali, invece, la ventilazione ascensionale è realizzata grazie alla presenza dei camini solari, realizzati in corrispondenza dei bagni al secondo piano ed emergente sul tetto. Queste soluzioni di ventilazione passiva sono mostrate in Fig. 9 e 10.



Figura 9 - Camino solare e Velux/Lucernario, con tetto verde in crescita



2.2.4.1 Applicazione del camino solare per la ventilazione naturale

La ventilazione naturale è una modalità di ventilazione adottata per garantire un adeguato ricambio d'aria allo scopo di controllare il livello di inquinanti all'interno degli ambienti. Se l'aria introdotta ha una temperatura inferiore a quella dell'ambiente interno, la ventilazione naturale può risultare un efficace strumento per garantire un raffrescamento passivo degli edifici.

Questo approccio può essere attuato sfruttando sia l'effetto camino, dovuto alla diversa densità dell'aria in presenza di un gradiente di temperatura, sia l'effetto del vento sulle facciate dell'edificio, il quale causa una differenza di pressione tra le stesse, inducendo una sovrappressione sulla facciata sopravento e una depressione su quella sottovento.

Tuttavia, questi processi naturali potrebbero non essere sufficienti a indurre una differenza di pressione tale da assicurare un flusso d'aria adeguato. Per ovviare alle circostanze sfavorevoli, è possibile considerare soluzioni che consentano di sfruttare l'energia solare per

instaurare il gradiente di densità necessario a garantire un efficace flusso ascendente di aria. Un esempio di tali soluzioni è rappresentato dal camino solare, a forma di tronco di cono e collegato agli spazi sottostanti tramite un'apertura orizzontale basculante, ed è costituito da due elementi chiave:

- Un collettore avente il compito di massimizzare l'assorbimento dell'energia solare e convertirla in calore;
- Un condotto di ventilazione, posizionato all'interno di una struttura esterna parzialmente trasparente, collegato al bagno sottostante), dedicato all'espulsione dell'aria dagli ambienti occupati.

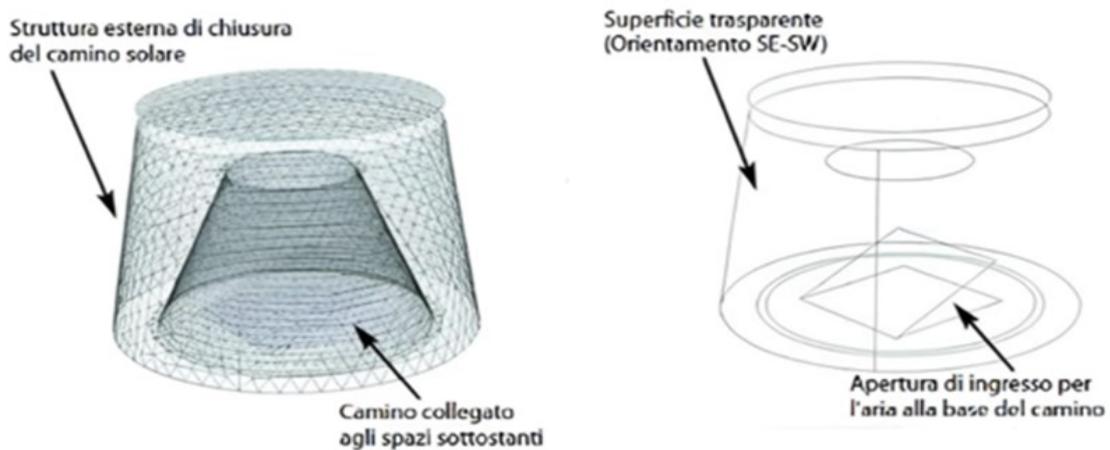


Figura 11 - Villi Giacomo (2012). La ventilazione naturale attivata da camino solare. Il progetto sostenibile, 31, 17. Rappresentazione del camino solare e dell'orientazione della superficie trasparente

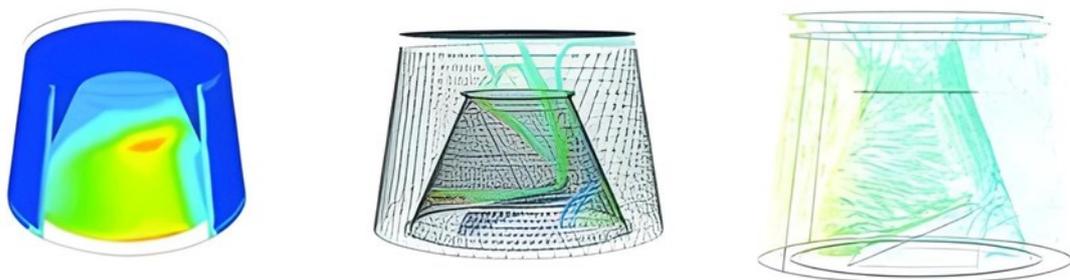


Figura 12 - Villi Giacomo (2012), La ventilazione naturale attivata da camino solare. Il progetto sostenibile, 31, 17. Da sinistra verso destra: incremento di temperatura per la porzione di struttura trasparente del camino solare, campo di moto all'interno del

2.3 Sistema di monitoraggio

Nell'ottica di una sperimentazione innovativa, il progetto prevede il monitoraggio di alcuni alloggi al fine di valutare l'efficacia delle soluzioni ambientali e tecnologiche adottate. In particolare, la campagna di misure mira a valutare il raggiungimento di adeguati livelli di comfort termo-igrometrico, l'efficacia dei sistemi di ventilazione naturale e meccanica, i consumi energetici e l'impatto dei tetti verdi. Successivamente, questi dati verranno utilizzati per la calibrazione del modello di simulazione dell'edificio.

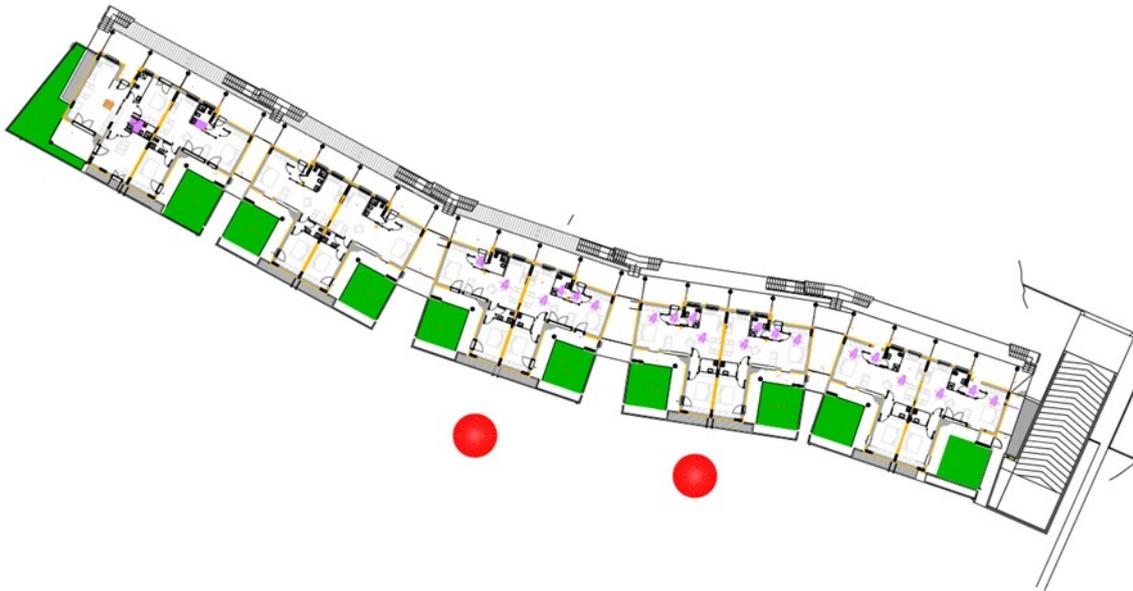


Figura 13 - Blocchi monitorati

Il sistema di monitoraggio ha il suo punto di partenza nel locale tecnico (Fig.14), situato nel sottoterrato. In questo locale tecnico sono collocati il dispositivo Modbus RTU e l'IoT gateway, che fungono da centrali di controllo e raccolta dei dati. Da qui, parte un cavo dati che si estende attraverso tutte le unità abitative in serie, connesso a diversi sensori ambientali e misuratori elettrici.

Questo cablaggio in serie consente al sistema di raccogliere dati da sensori posizionati in diverse parti delle unità residenziali, permettendo una raccolta dettagliata delle informazioni sul comfort termico, sulla qualità dell'aria e sui consumi energetici..

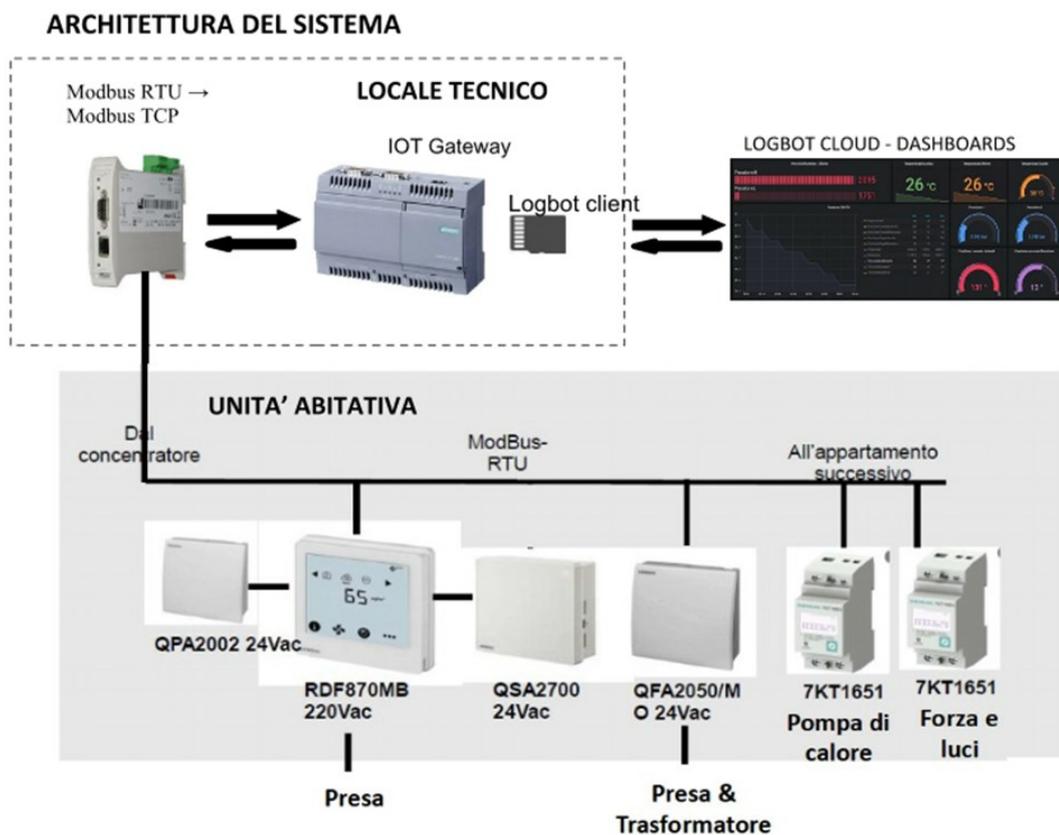


Figura 14 - Architettura del sistema di monitoraggio

Si esaminano in dettaglio i vari dispositivi all'interno del sistema di monitoraggio:

LOCALE TECNICO (PIANO INTERRATO):

- **Modbus RTU**: è un protocollo di comunicazione seriale utilizzato per lo scambio di dati tra dispositivi di controllo e i cosiddetti "dispositivi di campo". I dispositivi di campo, nel nostro contesto, sono i sensori situati all'interno dell'unità abitativa. Nel contesto dell'utilizzo di Modbus RTU, un dispositivo installato all'interno del locale tecnico funge da "master", il quale è responsabile della gestione della comunicazione. Questo dispositivo master comunica con i "dispositivi slave", che, nel nostro caso, sono rappresentati da sensori e contatori collocati all'interno dell'unità abitativa. Esso permette di raccogliere i dati dai vari sensori e trasmetterli al sistema di monitoraggio remoto attraverso l'*IoT Gateway* e la piattaforma cloud *Logbot*.
- **IoT Gateway**: è un dispositivo che funziona come punto di connessione e permette la comunicazione remota tra la rete **Modbus RTU** e il cloud, consentendo di raccogliere i dati e inviarli al cloud per l'analisi e il monitoraggio in tempo reale.

- **Scheda SIM machine to machine (M2M):** consente la connessione a internet e la comunicazione a distanza con **Logbot**.
- **Piattaforma Logbot:** è una piattaforma cloud che permette la gestione dei dispositivi IoT, raccolta dati e la rappresentazione visiva di quest'ultimi attraverso delle *dashboard*.

UNITA' ABITATIVA:

- **RDF870MB 220Vac:** è un controller che monitora la concentrazione delle polveri sottili PM2.5 e di biossido di carbonio CO₂ nell'ambiente.
- **QSA2700 24Vac:** Sensore per la misurazione di PM2.5 e PM10 all'interno dell'unità abitativa.
- **QPA2022 24Vac:** Sensore per la misurazione di biossido di carbonio CO₂ all'interno dell'unità abitativa.
- **QFA2050 / MO:** Sensore utilizzata per il rilevamento dell'umidità relativa e della temperatura dell'aria all'interno dell'unità abitativa.
- **7KT1651 SENTRON per la PdC:** dispositivo utilizzato per monitorare il consumo di energia elettrica della pompa di calore.
- **7KT1651 SENTRON per forza e luci:** dispositivo utilizzato per misurare il consumo elettrico delle apparecchiature e delle luci all'interno dell'unità abitativa.

Tabella 11 - Caratteristiche tecniche dei sensori installati

Sensore	Parametro	Range di misura	Accuratezza
<i>7KT1651 SENTRON</i>	Corrente elettrica	0-1651 A	±0,5% nell'intervallo da 5% a 100% della corrente nominale e del ±1% nell'intervallo da 0% a 5% della corrente nominale.
<i>QFA2050 / MO</i>	UR, T	UR: 0...95 [%] T: -40...70 [C°]	23 °C: ±0.3 K, 0...95 % r.h.: ±5 % r.h.
<i>QPA2002 24Vac</i>	CO ₂	0...2000 [ppm]	± (50 ppm + 2 % del valore misurato)
<i>QSA2700 24Vac</i>	PM10, PM2.5	0 - 500 [µg/m ³]	Massimo ±15 µg/m ³ a 25 °C e 50% UR.

2.3.1 Logica di ritenzione dei dati

La piattaforma **Logbot** segue una politica di ritenzione dei dati che pone un'enfasi significativa sui dati più recenti e sfrutta le proprietà statistiche dei dati più datati. I dati più recenti sono prioritari in quanto sono di maggiore rilevanza per l'identificazione di eventi attuali; pertanto, vengono conservati con una risoluzione temporale elevata. In questo caso, l'utente può visualizzare ed analizzare un set di dati accessibili con un timestep breve. D'altro canto, i dati più datati sono utilizzati principalmente per le loro proprietà statistiche e contribuiscono alla previsione delle tendenze future. Pertanto, per questi dati, non è richiesta una risoluzione elevata. Avendo come riferimento l'istante corrente in cui si entra nella piattaforma cloud, la politica di ritenzione dei dati è definita come segue [47]:

- I dati sono accessibili fino alla prima settimana con un campionamento minimo di dieci secondi.
- I dati sono accessibili fino al primo mese con un campionamento minimo di 1 minuto.
- I dati sono accessibili fino a 100 giorni con un campionamento minimo di 10 minuti.
- I dati sono accessibili fino a 5 anni con un campionamento minimo di 1 ora.
- I dati sono accessibili fino a 10 anni con un campionamento minimo di 1 giorno.

Quando si vanno ad analizzare dati che temporalmente si collocano oltre una delle soglie sopra citate, ad esempio oltre la settimana dal momento di accesso alla piattaforma, il sistema cloud fa un'operazione di integrazione sui dati più vecchi, passando dal timestep più breve a quello corrispondente ai range temporali sopra enunciati.

Durante questo processo, l'obiettivo principale è minimizzare la perdita di informazioni, garantendo la conservazione delle tre proprietà fondamentali all'interno del nuovo intervallo: valore massimo, valore minimo e valore medio. Questo approccio bilancia l'archiviazione dei dati, mantenendo quelli più recenti con una risoluzione più alta e quelli più datati con una risoluzione ridotta, ma comunque con informazioni statisticamente significative.

Questo processo, come si vedrà nel capitolo successivo, ha costretto ad effettuare l'analisi dati su valori di dieci minuti, comportando la perdita di dettagli rilevanti, specialmente per quanto riguarda i picchi delle diverse grandezze.

Capitolo 3

Analisi dei dati di monitoraggio

In questo capitolo verrà presentata un'analisi dettagliata dei parametri ambientali degli appartamenti residenziali con differenti sistemi di ventilazione. I parametri monitorati includono la temperatura interna (T), la concentrazione di anidride carbonica (CO₂), particolato sospeso (PM10) e umidità relativa (UR). I risultati includono profili medi dei parametri, analisi statistica e considerazioni sulle implicazioni per la salute e il comfort dei residenti nei due blocchi. Saranno altresì considerati i consumi elettrici e i profili di carico attraverso un confronto con i dati forniti da ARERA.

3.1 Metodologia

I dati relativi ai parametri ambientali sono stati raccolti utilizzando i sensori di monitoraggio posizionati nel soggiorno dei dodici alloggi residenziali, suddivisi equamente in due blocchi. Per l'analisi del periodo invernale è stato considerato solamente il mese di marzo, mentre, per quanto riguarda il periodo estivo (giugno, luglio e agosto), sono stati analizzati tutti i dodici gli appartamenti. La mancanza di dati per i mesi di gennaio e febbraio è legata all'architettura del sistema di monitoraggio. Infatti, il cavo dati, partendo dal locale tecnico, passa attraverso tutti gli appartamenti in serie; quindi, l'interruzione in uno influisce sulla comunicazione dati in tutto il sistema. Quindi, se uno qualsiasi degli appartamenti dovesse subire un'interruzione elettrica o, come avvenuto tra gennaio/febbraio, se in uno degli alloggi si dovesse interrompere l'alimentazione dal quadro elettrico in quanto non ancora abitati, verrebbe compromesso la raccolta dati di tutti gli appartamenti. Questa mancanza di dati rappresenta una significativa limitazione nell'ambito dell'analisi e della comprensione delle dinamiche degli appartamenti monitorati. Va notato, però, che queste problematiche rappresentano sfide comuni che possono verificarsi all'inizio di attività di monitoraggio, e saranno utili per migliorare il sistema in vista di analisi future.

I dati vengono campionati con una timestep di acquisizione di 30 secondi. Tuttavia, a causa della politica di ritenzione dei dati, essi sono stati analizzati con un timestep di 10 minuti.

Gli appartamenti sono stati suddivisi in quattro tipologie:

Tabella 12 - Divisione degli appartamenti per blocco e sistema di ventilazione

Categoria	Appartamenti	Blocco
Ventilazione Meccanica Doppio Flusso	5A	C
Ventilazione Meccanica a Singolo Flusso	7A, 8A	D
	6A	C
Ventilazione Naturale e Camino Solare	20E, 21E	C
	24E, 25E	D
Ventilazione Naturale con Lucernario	19D, 22C	C
	23C, 26H	D

Per ciascuna categoria di appartamenti sono stati calcolati i seguenti parametri:

- **Profilo medio di CO₂, PM₁₀, UR e Temperatura:** Sono stati calcolati i profili medi orari mensili di ciascun parametro, effettuando una differenziazione tra profilo feriale e profilo del week-end per identificare eventuali differenze significative.
- **Dati statistici:** sono stati calcolati media, deviazione standard, massimo, minimo mediana e quartili al fine di comprenderne il comportamento e la variabilità all'interno di ciascuna categoria di appartamenti.

Ogni parametro ambientale verrà analizzato per il mese di marzo, rappresentativo della stagione invernale. Successivamente, viene effettuata l'analisi sui mesi di giugno, luglio e agosto, che corrispondono alla stagione estiva, per quanto riguarda la temperatura, mentre per gli altri parametri si considera solamente agosto come rappresentativo della stagione estiva. Infatti, durante questo mese non si sono riscontrate variazioni significative rispetto agli altri mesi, ed è anche il mese più completo di dati a disposizione per l'analisi dettagliata. Questa suddivisione stagionale permette di esaminare le condizioni ambientali in momenti dell'anno differenti, contribuendo a una comprensione più approfondita delle variazioni nei parametri ambientali nel corso delle stagioni invernali ed estive.

3.2 CO₂

La CO₂ è un prodotto di scarto fondamentale della respirazione cellulare, il processo attraverso il quale le cellule degli organismi viventi ottengono energia dai nutrienti. In condizioni normali, un adulto produce approssimativamente 20 litri di CO₂ all'ora, mentre i bambini ne emettono circa 10 litri durante l'attività respiratoria.

La concentrazione di CO₂ nell'aria esterna, solitamente intorno allo 0,04% in termini di volume o 400 parti per milione (ppm), serve come punto di riferimento per la qualità dell'aria all'aperto. Tuttavia, all'interno di edifici o stanze, questa concentrazione può variare significativamente a causa della produzione umana, della ventilazione e di altre fonti, come la cottura dei cibi o il funzionamento di dispositivi elettrici.

La norma EN 16798 1:2019 [14] utilizza la concentrazione di CO₂ come un indicatore della qualità dell'aria interna di un ambiente. Essa suddivide le categorie di IAQ in base alla differenza di concentrazione di CO₂ tra l'ambiente interno e quello esterno (tab.13), solitamente assunto pari a 400 ppm, e assumendo una produzione standard di CO₂ di 20 L/h per persona.

Tabella 13 - Massima differenza di concentrazione di CO₂ tra interno ed esterno per ciascuna categoria di IAQ definita nella normativa EN 16798-1:2019

CATEGORIA	ΔCO₂ [ppm]
I	550
II	800
III	1350
IV	1350

Le ricerche condotte dal chimico Pettenkofer, ampiamente accettate a livello internazionale come punto di riferimento, hanno dimostrato che le persone si sentono a loro agio in ambienti dove la concentrazione di anidride carbonica è inferiore allo 0,1% (equivalente a 1000 ppm). Al contrario, quando la concentrazione supera lo 0,2% (corrispondente a 2000 ppm), le persone manifestano un evidente disagio, che si traduce in una diminuzione dell'attenzione, della produttività e del loro benessere generale. Quindi affinché la qualità dell'aria possa essere definita buona, la concentrazione di CO₂ dovrebbe rimanere al di sotto dei 1000 ppm [31].

3.2.1 Risultati delle misurazioni di CO₂ durante il periodo invernale

La Fig. 17 mostra le variazioni i profili di concentrazione di CO₂ per quattro appartamenti del Blocco C, rispettivamente il 5A, 22C, 20E e 21E. Il 19D è stato escluso in quanto gli inquilini sono entrati a partire dalla seconda metà di marzo, mentre il 6A presentava valori che oscillavano tra 350-400 ppm, mostrando un andamento poco realistico. Osservando i profili, non sembra esserci un chiaro pattern nel trend tra feriale e weekend (Fig.17).

Osservando la distribuzione statistica della concentrazione di CO₂ nei diversi appartamenti, come indicato in Tab.12 e mostrato in Fig.16, si possono fare le seguenti considerazioni:

- L'Appartamento **5A** presenta una concentrazione media di CO₂ di 1245.9 ppm con una deviazione standard di 385.6 ppm. Questo indica una variabilità significativa nei livelli di CO₂. Tuttavia, considerando che il valore del primo quartile (Q1) è di 960.4 ppm, si può dedurre che circa il 75% delle misurazioni supera questa soglia. Questo fatto suggerisce che una parte significativa dei dati si avvicina o supera il valore di 1000 ppm. Ad un primo impatto, potrebbe sembrare che il sistema di ventilazione meccanica a doppio flusso non sia completamente efficace nel mantenere bassi i livelli di CO₂. In realtà, essendo l'appartamento abitato solo da due adulti, è possibile che la principale causa dei livelli elevati di CO₂ sia la mancanza di utilizzo del sistema di ventilazione anziché l'inefficienza del sistema stesso. In un ambiente con un numero così limitato di occupanti, i livelli di CO₂ dovrebbero teoricamente rimanere sotto controllo se il sistema di ventilazione fosse funzionante e utilizzato correttamente. In questo caso, potrebbe essere utile educare gli occupanti sull'importanza di utilizzare il sistema di ventilazione in modo regolare per garantire una buona qualità dell'aria interna.

- L'Appartamento **20E** mostra una concentrazione media di CO₂ inferiore, pari a 789.7 ppm, con una deviazione standard di 184.7 ppm. Questi dati indicano una minore variabilità nei livelli di CO₂ rispetto al 5A. La distribuzione dei dati è più uniforme, come indicato dai quartili, con un primo quartile di 657.9 ppm e un terzo quartile di 880.1 ppm. La mediana è di 789.7 ppm, suggerendo che la ventilazione naturale con camino solare funziona efficacemente nel mantenere i livelli di CO₂ relativamente bassi.

- L'Appartamento **21E** presenta una concentrazione media di CO₂ di 892.8 ppm e una deviazione standard di 175.5 ppm. Anche qui, la ventilazione naturale con camino solare sembra svolgere un buon lavoro. La mediana è di 926.55 ppm, il primo quartile (778.6 ppm) e il terzo quartile (1019.5 ppm). Dato che la maggior parte delle misurazioni (75%) è al di

sotto del terzo quartile, quindi sotto i 1019.5 ppm, questi dati suggeriscono una buona efficacia del sistema di ventilazione.

- L'Appartamento **22C** mostra concentrazioni medie di CO₂ relativamente elevate, con una media di 972.8 ppm e una deviazione standard di 241.3 ppm. La distribuzione dei dati è ampia, ma i quartili indicano che la maggior parte delle misure è compresa tra 816.3 ppm (primo quartile) e 1127.9 ppm (terzo quartile). Anche in questo caso si può affermare che il sistema di ventilazione naturale con lucernario funziona in maniera piuttosto efficace nel mantenere bassi i livelli di CO₂.

Tabella 14 - Valori statistici della concentrazione di CO₂ per il mese di marzo considerando i valori campionati ogni 10 minuti

Appartamento	Media (SD) [ppm]	Min [ppm]	Q1 [ppm]	Mediana [ppm]	Q3 [ppm]	Max [ppm]
5A	1245.9 (385.6)	400	960.4	1257.6	1505.6	2144.1
20E	730.2 (184.7)	400	657.9	789.7	880.1	1213.1
21E	892.8 (175.5)	439.2	778.6	926.55	1019.5	1274.6
22C	972.8 (241.3)	446.1	816.3	964.3	1127.9	1610.8

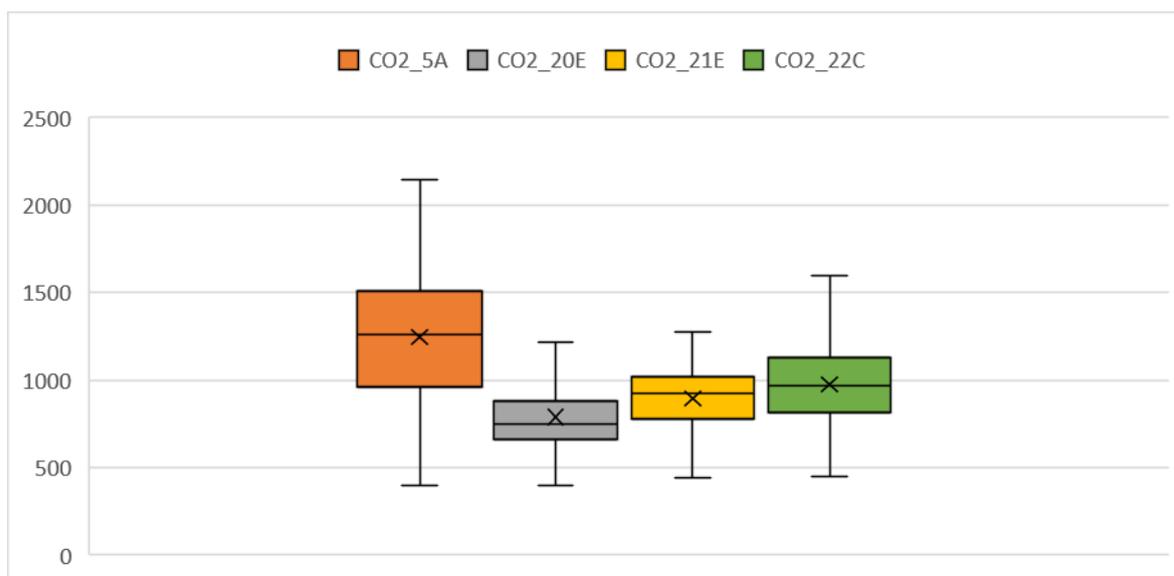


Figura 15 - Distribuzione statistica della concentrazione di CO₂ per il mese di marzo

Per una maggiore chiarezza si riporta in Fig.16 la percentuale di ore in cui la concentrazione di CO₂ rientra nei limiti delle categorie individuate dalla normativa EN 16798-1:2019.

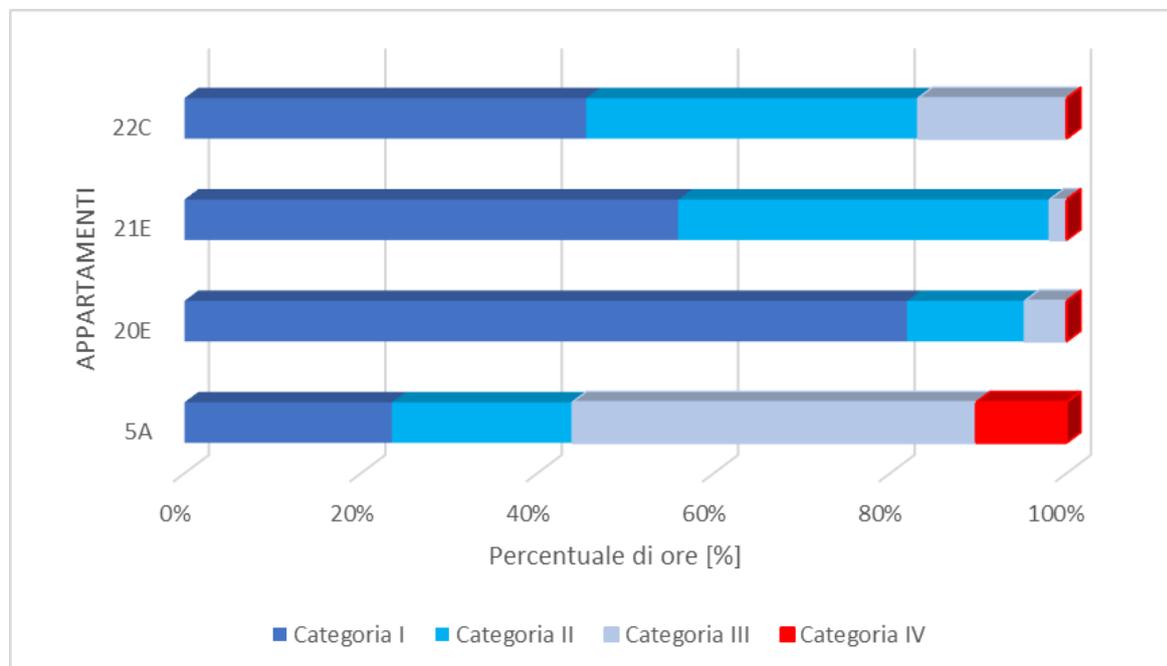


Figura 16 - Percentuale di ore nel mese di marzo in cui la concentrazione di CO₂ rientra nelle diverse categorie di qualità dell'aria, secondo normativa EN 16798-1:2019

Come avevamo visto dall'analisi dei parametri statistici, l'unico alloggio che presenta delle criticità per quanto riguarda la concentrazione di CO₂, durante il periodo invernale, è l'appartamento **5A**, il quale si trova in categoria IV per il 10% delle ore di marzo.

Se prendessimo, invece, come riferimento quanto suggerito dalle ricerche di Von Pettenkofer, a cui corrisponde indicativamente la categoria II della normativa, risulterebbe che nell'appartamento **5A**, durante il mese di marzo, la concentrazione di CO₂ supera ampiamente questa soglia per il 60% delle ore. Questo implica la necessità di porre particolare attenzione alla qualità dell'aria di questa unità abitativa, per evitare potenziali impatti negativi sulla salute, la produttività e il benessere degli occupanti.

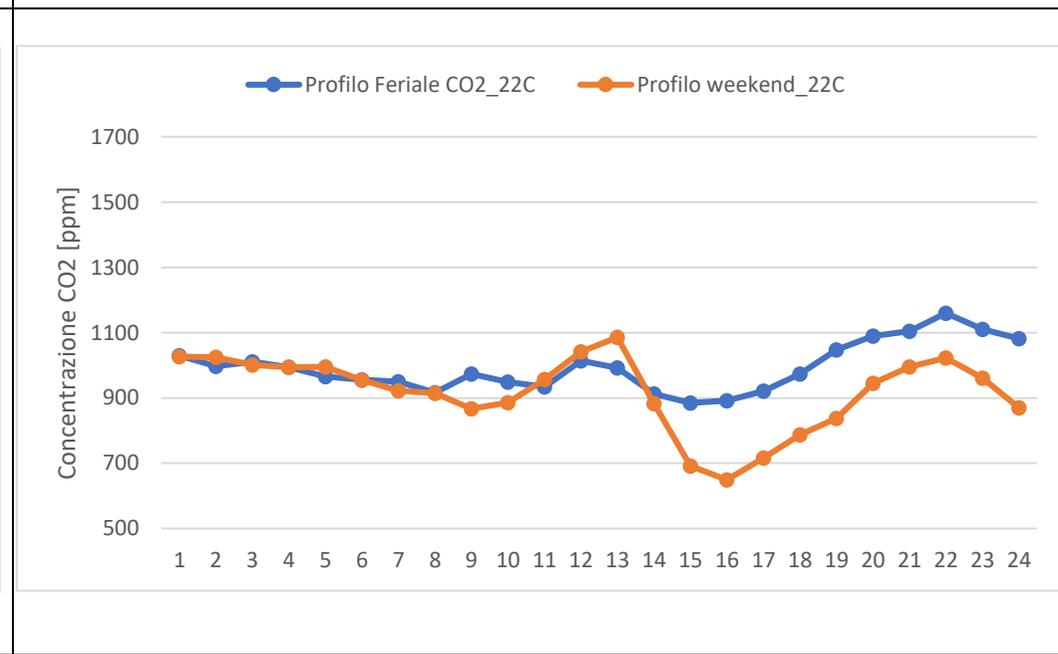
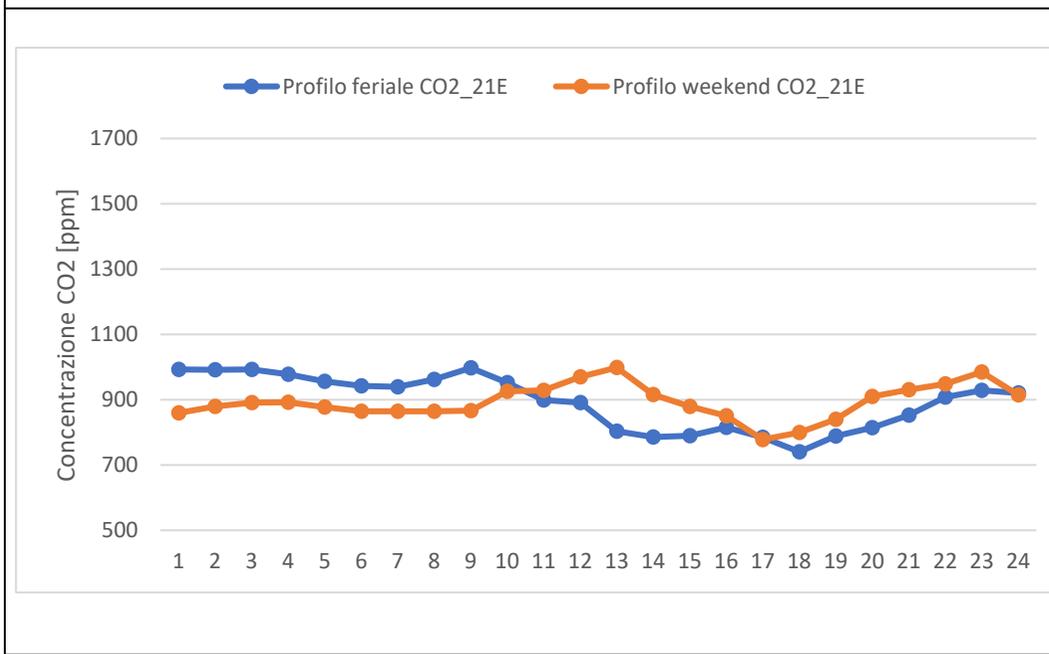
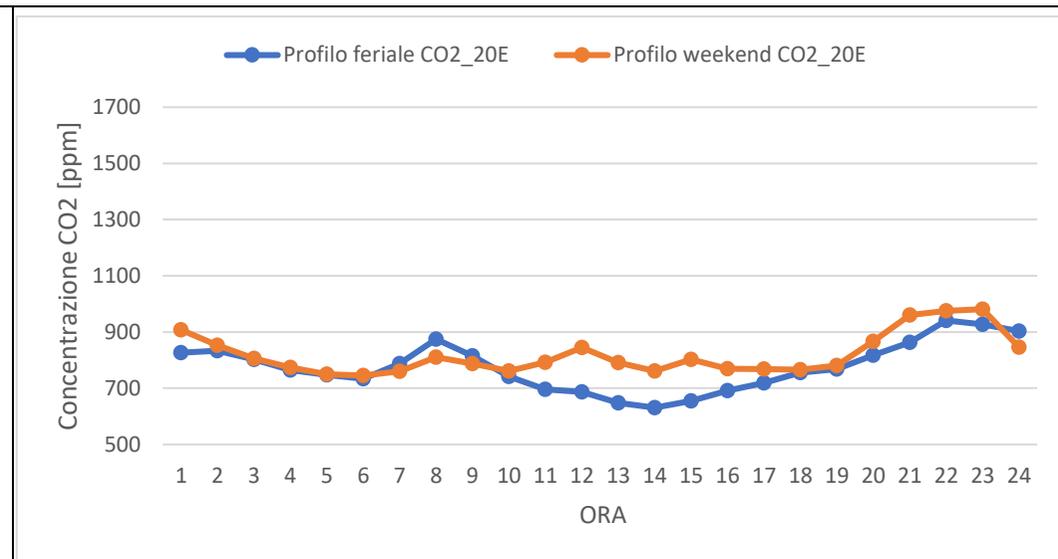
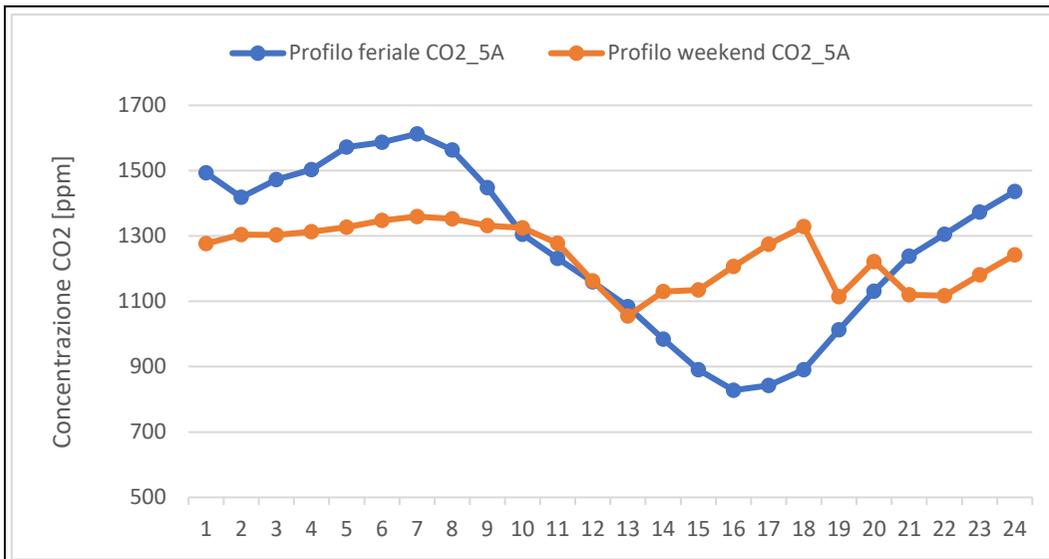


Figura 17 - Profili medi orari di CO2 per il mese di marzo con distinzione in giorno feriale e week-end.

3.2.2 Risultati delle misurazioni di CO₂ durante la stagione estiva

Nell'ambito dell'analisi della CO₂, è stato scelto di utilizzare il mese di agosto come periodo rappresentativo della stagione estiva, poiché durante tale mese si dispone di una quantità di dati più completa. Tuttavia, saranno inclusi anche i profili relativi ai mesi di giugno e luglio al fine di fornire una visione completa ed esaustiva dell'andamento della concentrazione di CO₂ nel corso dell'intero anno.

3.2.2.1 Appartamenti Blocco C

Come si può vedere dai dati statistici (Tab. 15) e dai profili medi orari (Fig.20), tutti gli appartamenti oggetto dell'analisi soddisfano i limiti normativi riguardanti la concentrazione di anidride carbonica. Infatti, tutti presentano un valore massimo di concentrazione di CO₂ al di sotto del limite di 1000 parti ppm suggerito da Von Pettenkofer, indicando una buona qualità dell'aria all'interno di questi spazi. Questo risultato è attribuibile alla necessità di controllare e limitare le temperature interne negli appartamenti durante la stagione estiva. Infatti, essendo tali appartamenti non dotati di sistemi di raffrescamento, vi è un ricorso più frequente ai sistemi di ventilazione di cui gli appartamenti sono dotati. L'impiego regolare di questi sistemi di ventilazione contribuisce in modo significativo a mantenere i livelli di CO₂ entro i limiti accettabili a differenza della stagione invernale, in cui la dinamica è opposta per esigenze di comfort termico. Di conseguenza, in inverno, si è più inclini a registrare un aumento nei livelli di CO₂ all'interno degli appartamenti, come abbiamo visto precedentemente.

Tabella 15 - Valori statistici della concentrazione di CO₂ per il mese di agosto considerando i valori campionati ogni 10 minuti, Blocco C

Appartamento	Media (SD) [ppm]	Min [ppm]	Q1 [ppm]	Mediana [ppm]	Q3 [ppm]	Max [ppm]
5A	512.1 (112.7)	400	400	506.4	592.6	880.8
20E	424.5 (432.2)	400	400	444.9	479.1	596
21E	596.3 (634.7)	439	528.4	617.7	694.6	915.5
22C	474.9 (118.1)	400	417.8	495.1	542.8	729.8

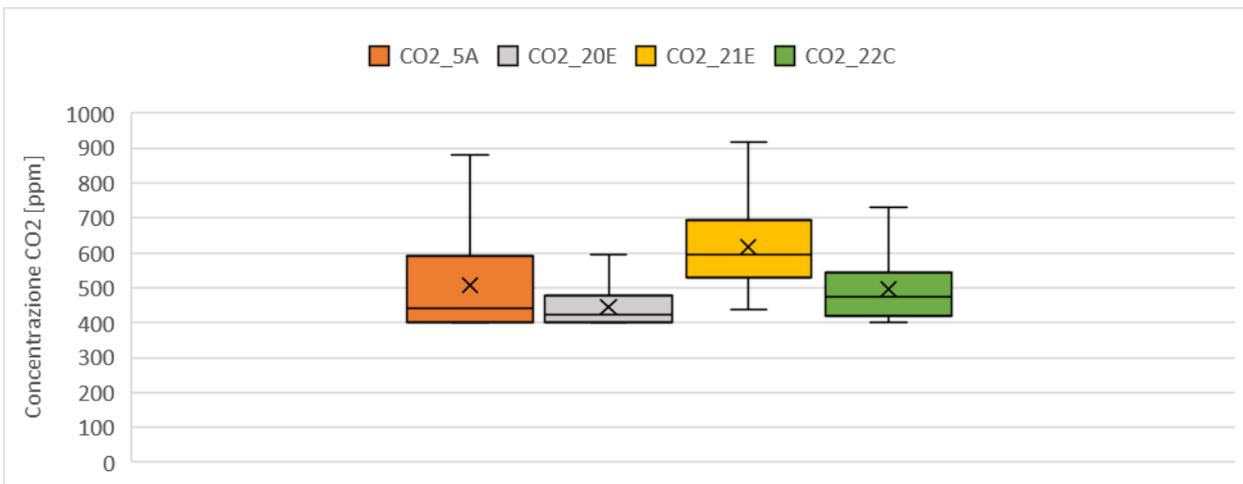


Figura 18 - Distribuzione statistica della concentrazione di CO2 per il mese di agosto, Blocco C

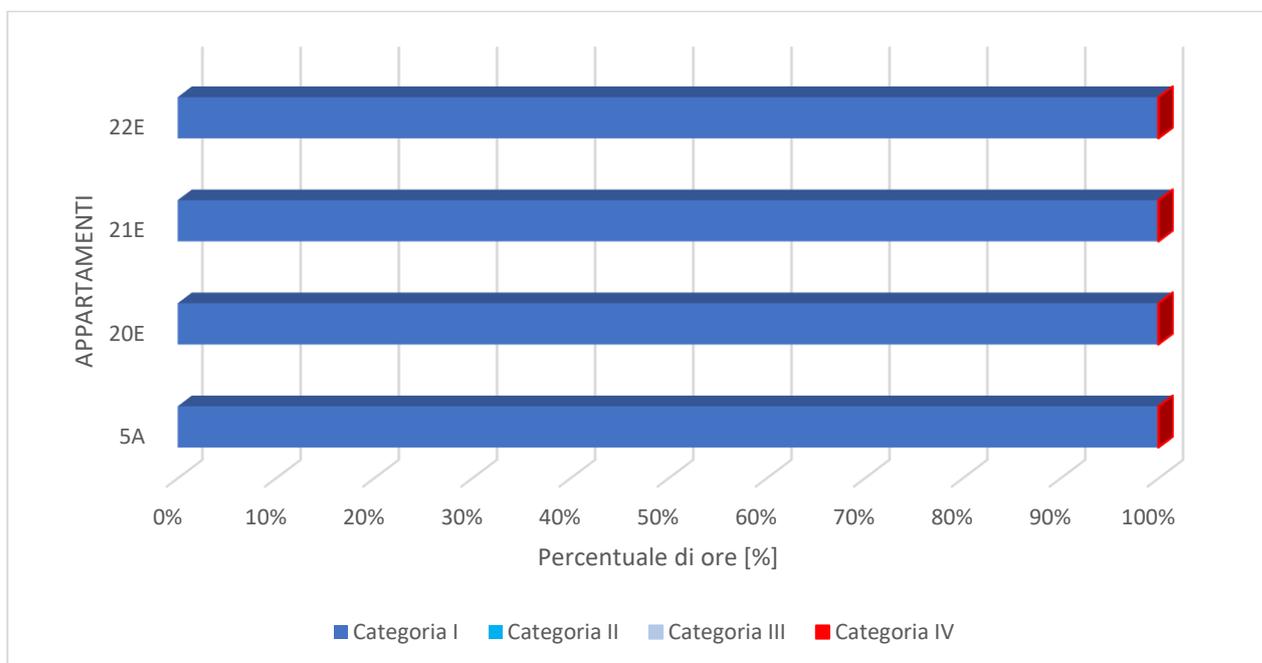


Figura 19 - Percentuale di ore nel mese di agosto in cui la concentrazione di CO2 rientra nelle diverse categorie di qualità dell'aria, secondo normativa EN 16798-1:2019, Blocco C

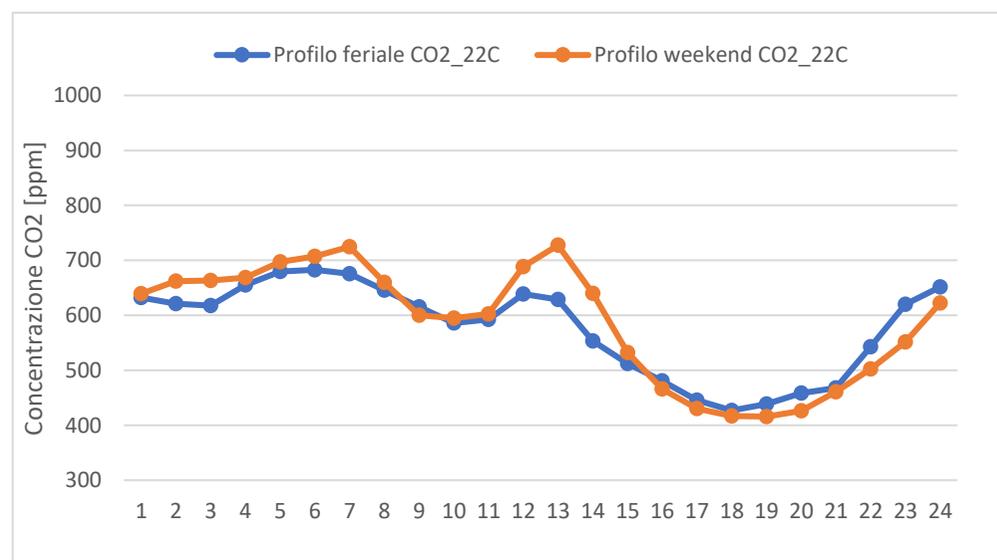
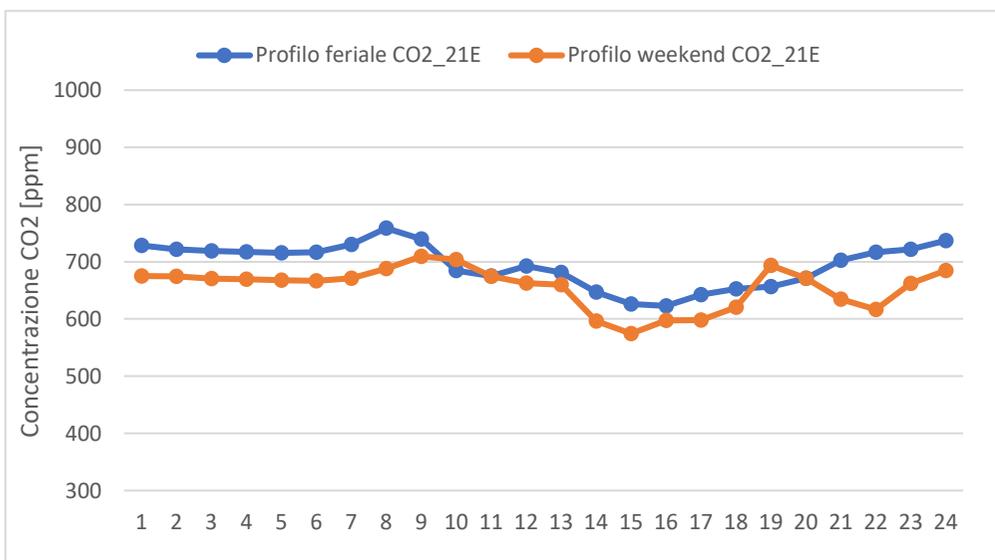
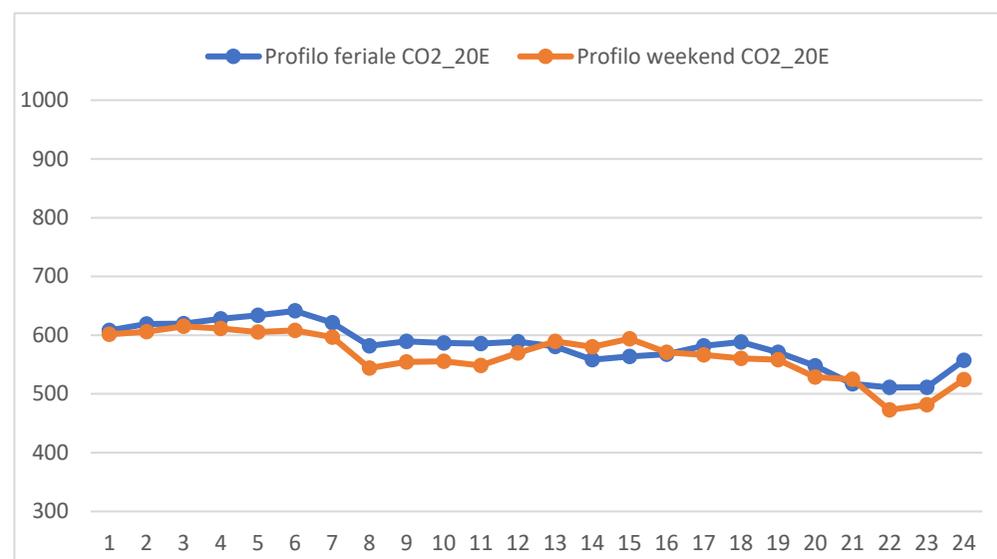
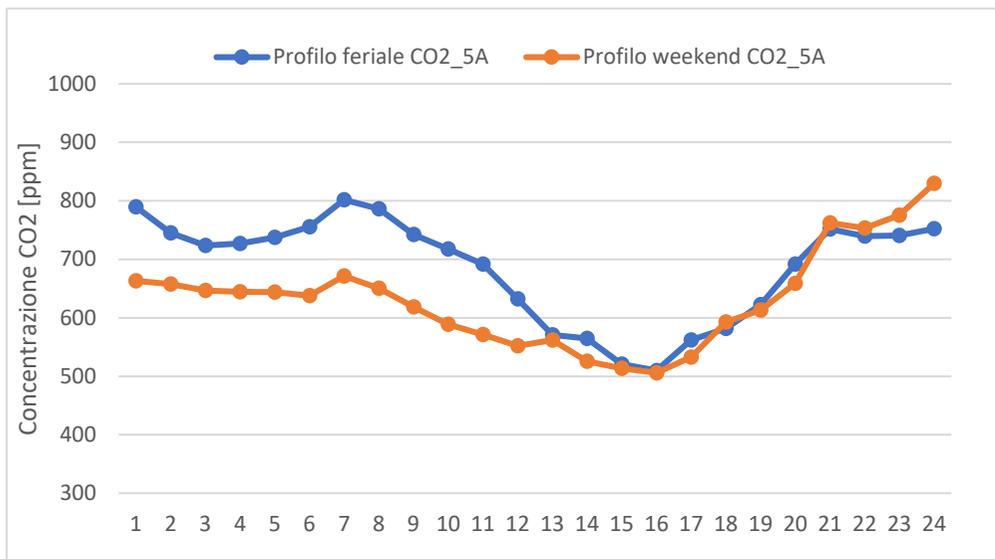


Figura 20 - Profili medi orari di CO2 per il mese di agosto con distinzione in giorno feriale e week-end, Blocco C

3.2.2.2 Appartamenti Blocco D

I dati relativi alle misurazioni di CO₂ durante il mese di agosto per il Blocco D, con l'eccezione dell'appartamento 23C, confermano le conclusioni simili a quelle del Blocco C per la stagione estiva. La maggior parte degli appartamenti sembra rispettare i limiti normativi per la concentrazione di CO₂, grazie all'uso regolare dei sistemi di ventilazione. Tuttavia, l'appartamento 23C presenta una concentrazione di CO₂ notevolmente più alta rispetto agli altri appartamenti, come riportato nella Tab. 16. Il valore medio, la mediana e i quartili indicano che la concentrazione di CO₂ in questo appartamento è notevolmente superiore rispetto alla maggior parte degli altri appartamenti, con picchi che superano i 1600 ppm. Questo aumento significativo, molto probabilmente, può essere attribuito all'installazione di un condizionatore split per il raffrescamento estivo, che ha comportato una riduzione dell'uso dei sistemi di ventilazione naturale. Questa scelta ha influenzato negativamente la qualità dell'aria all'interno dell'appartamento, poiché la limitata circolazione dell'aria ha portato a una concentrazione elevata di CO₂, con conseguente numero elevato di ore, per il mese di agosto, in categoria IV (Fig.22). Questa situazione sottolinea l'importanza di una gestione equilibrata dell'aria interna durante i mesi estivi, poiché l'uso di dispositivi di raffrescamento dovrebbe essere combinato con una corretta ventilazione per garantire un ambiente sano e confortevole.

Tabella 16 - Valori statistici della concentrazione di CO₂ per il mese di agosto considerando i valori campionati ogni 10 minuti, Blocco D

Appartamento	Media (SD) [ppm]	Min [ppm]	Q1 [ppm]	Mediana [ppm]	Q3 [ppm]	Max [ppm]
8A	483 (112.7)	400	400	400.5	579.2	784.6
23C	1019 (526.6)	461	729	1153	1275	1642
24E	509.5 (64.1)	439	474.7	507.1	535.6	609.9
25E	449 (64.1)	400	400	422.4	481	570
26H	507.6 (78.5)	449.3	471	485.9	593	791

Analisi parametri ambientali

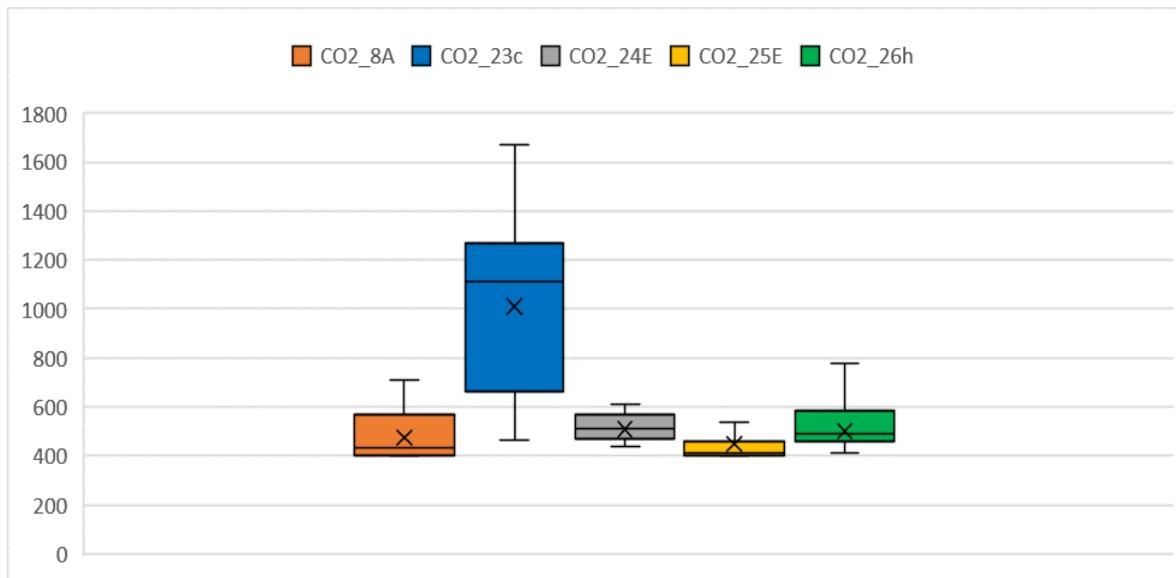


Figura 21- Distribuzione statistica della concentrazione di CO2 per il mese di agosto, Blocco D

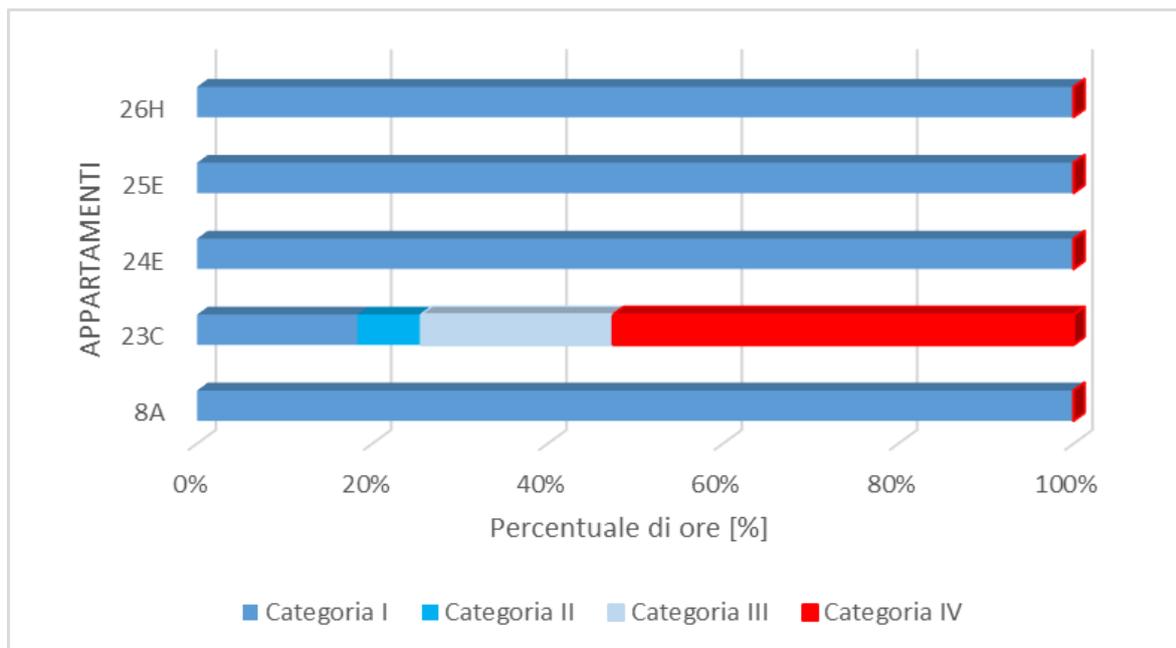


Figura 22 - Percentuale di ore nel mese di agosto in cui la concentrazione di CO2 rientra nelle diverse categorie di qualità dell'aria, secondo normativa EN 16798-1:2019, Blocco D

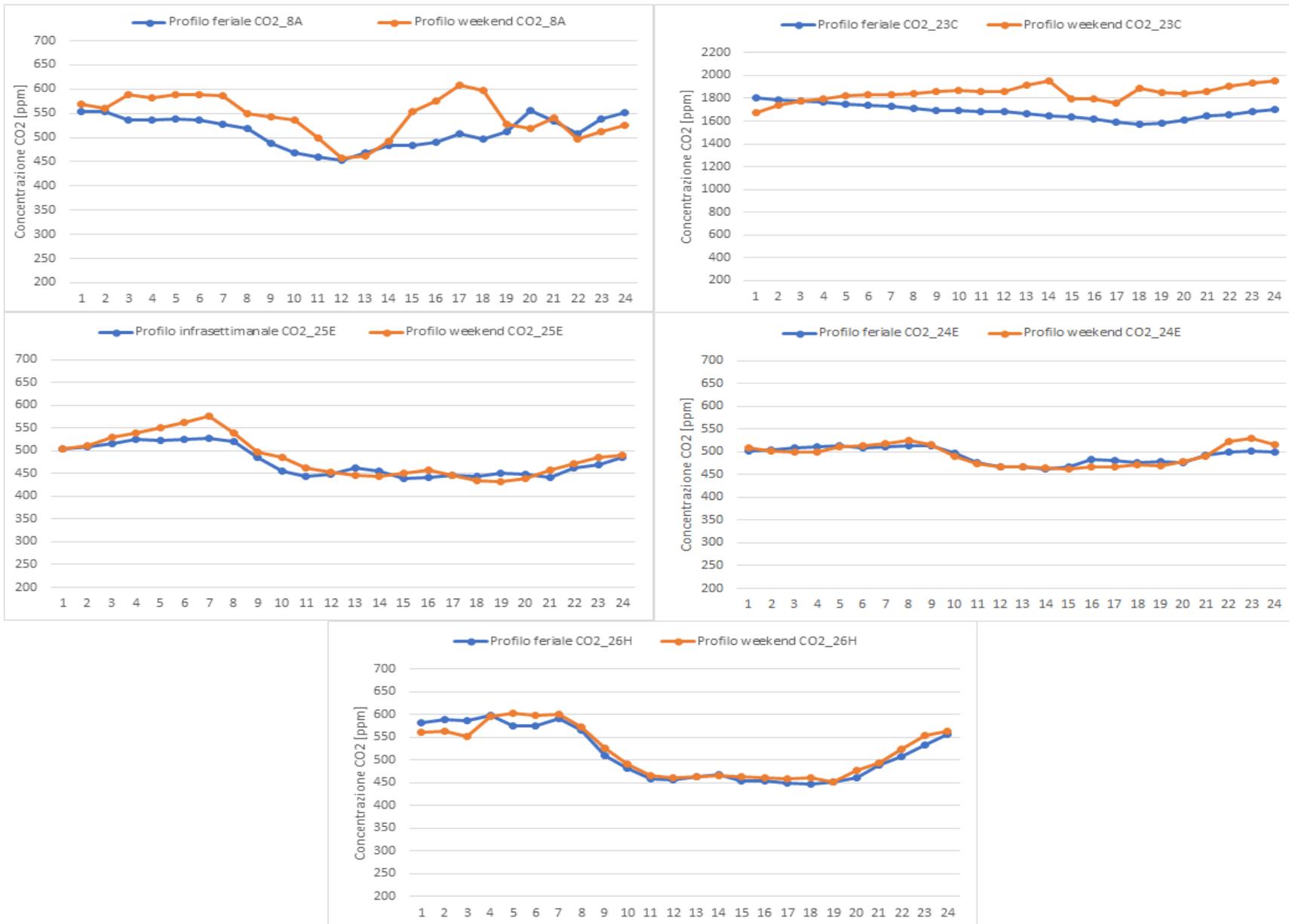


Figura 23 - Profili medi orari di CO2 per il mese di agosto con distinzione in giorno feriale e week-end, Blocco D.

3.3 PM10

Il PM10, acronimo di “Particulate Matter 10”, si riferisce ad una categoria di particolato atmosferico sospeso nell’aria che comprende particelle con dimensioni inferiori a 10 μm di diametro. Queste particelle sospese sono di particolare interesse per quanto riguarda l’analisi della qualità dell’aria, poiché sono sufficientemente piccole da poter essere inalate dall’uomo, con possibili effetti sulla salute. Le particelle di PM10 possono penetrare nelle vie respiratorie inferiori, raggiungendo i polmoni ed entrando persino nel flusso sanguigno. L’ esposizione a concentrazioni elevate di PM10 anche per brevi periodi, può causare problemi al sistema cardiorespiratorio.

Non essendoci indicazioni a livello nazionale sui limiti di concentrazione di PM10, si è preso come riferimento per i valori limite di esposizione quelli riportati dall’Organizzazione Mondiale della Sanità in WHO Air Quality Guidelines [31]:

Tabella 17 - Valore limite di esposizione PM10 secondo WHO Air Quality Guidelines [31]

Inquinante	Valore limite di esposizione
PM10	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ su un periodo di riferimento di 24 h
	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ su un periodo di riferimento di 1 anno

3.3.1 Risultati delle misurazioni di PM10 per il mese di marzo

I risultati di questa analisi, per il mese di marzo, hanno rivelato un quadro eterogeneo tra gli appartamenti presi in considerazione. Nel dettaglio, l'appartamento 6A ha superato il limite di esposizione al PM10 per 15 giorni durante il mese (Fig. 25), indicando una preoccupante frequenza di superamenti del limite raccomandato. In parallelo, sia l'appartamento 20E che l'appartamento 21E hanno registrato 2 giorni di superamento del limite di esposizione. È importante notare che l'Appartamento 22C non ha registrato alcun superamento del valore limite di esposizione al PM10 per l'intero mese di marzo. Questo risultato suggerisce una qualità dell'aria relativamente migliore rispetto agli altri appartamenti in esame. In generale, durante il periodo invernale, come già accennato per la concentrazione di CO₂, gli appartamenti dotati di sistemi di ventilazione naturale sembrano performare meglio di quelli a ventilazione meccanica, e la motivazione è da ricercare nel fatto che, molto probabilmente, tali sistemi sono stati usati sporadicamente. Questo è dovuto ad una sorta di preoccupazione

che la ventilazione meccanica possa aumentare i costi energetici, ma è importante notare che l'uso corretto e ben regolato di questi sistemi può essere molto efficiente dal punto di vista energetico ed è necessario per preservare una buona qualità dell'aria.

Tabella 18 - Valori statistici della concentrazione di PM10 per il mese di marzo considerando i valori campionati ogni 10 minuti, Blocco C

Appartamento	Media (SD) [ppm]	Min [ppm]	Q1 [ppm]	Mediana [ppm]	Q3 [ppm]	Max [ppm]
6A	74 (73.9)	4.1	7.7	46.5	22.2	431
20E	22.3 (34.9)	1	7.3	12.25	21.7	270.8
21E	32.2 (21.9)	1.7	14.6	26.5	42.6	146.1
22C	14.7 (14.6)	0.2	7.3	11.7	20.9	172.1

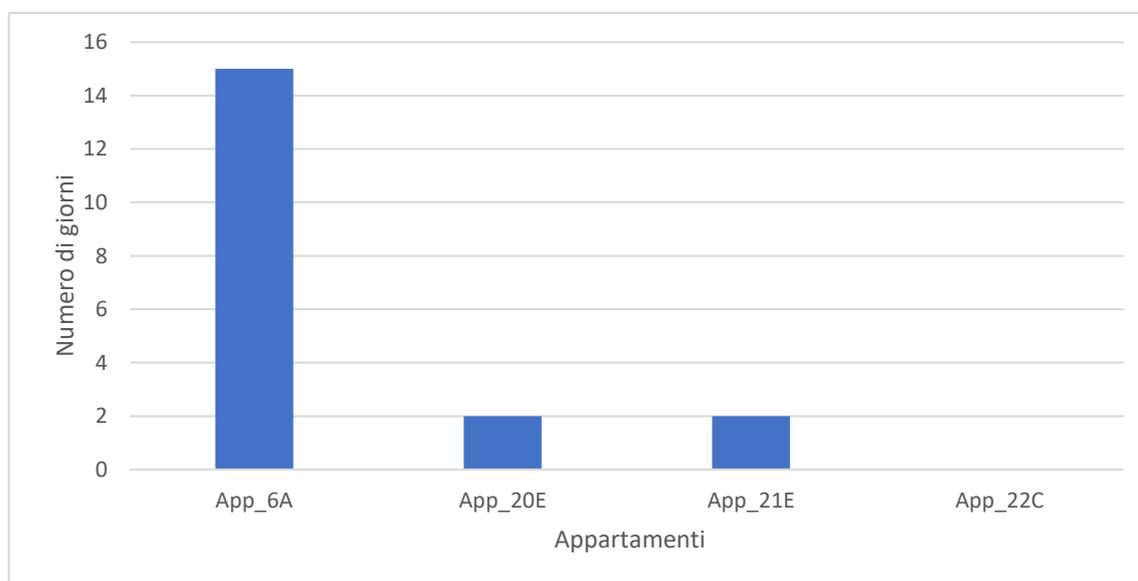


Figura 24 - Numero di giorni per il mese di marzo in cui è stato superato il valore limite di PM10, Blocco C.

3.3.2 Risultati delle misurazioni di PM10 durante la stagione estiva

Per quanto riguarda l'analisi sulla concentrazione di PM10 nei differenti alloggi per il mese di agosto, i dati rivelano una notevole variabilità nei livelli PM10 tra gli appartamenti. In particolare, l'appartamento 5A, dotato di un sistema di ventilazione meccanica a doppio flusso, presenta una media di PM10 significativamente più elevata rispetto a tutti gli altri appartamenti, sia a quelli a ventilazione meccanica a singolo flusso che quelli a ventilazione naturale. Questo suggerisce che, molto probabilmente, il sistema non sia mai stato acceso, oltre al fatto che c'è un'assenza totale di aerazione attraverso l'apertura delle finestre.

Va notato, inoltre, che i dati presentano deviazioni standard significative, indicando una considerevole variabilità nelle misurazioni durante il mese di agosto, dovuta probabilmente alle condizioni atmosferiche esterne e alle attività svolte all'interno degli appartamenti. In generale, ad esclusione dell'appartamento 5A, il quale supera il valore limite di esposizione per 14 giorni, gli altri appartamenti rientrano nei limiti consentiti. Per gli appartamenti del Blocco D, nessuno mostra problematiche rilevanti, in quanto nessuno supera il valore limite di esposizione, come dimostrato dall'analisi dei dati statistici in Tab.19.

Tabella 19 - Valori statistici della concentrazione di PM10 per il mese di agosto considerando i valori campionati ogni 10 minuti, Blocco C e Blocco D.

Appartamento	Blocco [ppm]	Sistema di ventilazione	Media (SD) [ppm]	Min [ppm]	Q1 [ppm]	Mediana [ppm]	Q3 [ppm]	Max [ppm]
5A	C	VMC doppio flusso	21.2 (35.8)	0	1.2	9.4	29.2	71
6A	C	VMC singolo flusso	2.1 (8)	0	0.3	1.9	2.3	3
8A	D		8.9 (7.9)	0	2.3	8.1	12.	27.6
20E	C	Ventilazione naturale con camino solare	11.2 (20.3)	0	0.6	2	8.3	19.5
24E	D		1.61 (6)	0	0.1	0.9	1.8	4
21E	C		4.9 (13.9)	0	1	1.9	3.425	7
25E	D		1 (7.2)	0	0	1.5	2	3.4
22C	C		2.9 (4.7)	0	0.8	1.7	1.7	4.2
23C	D	Ventilazione naturale con lucernario	3.1 (7.2)	0	0.6	2	3.6	8
26H	D		2.44 (6.4)	0	0.3	1	2.9	6.7

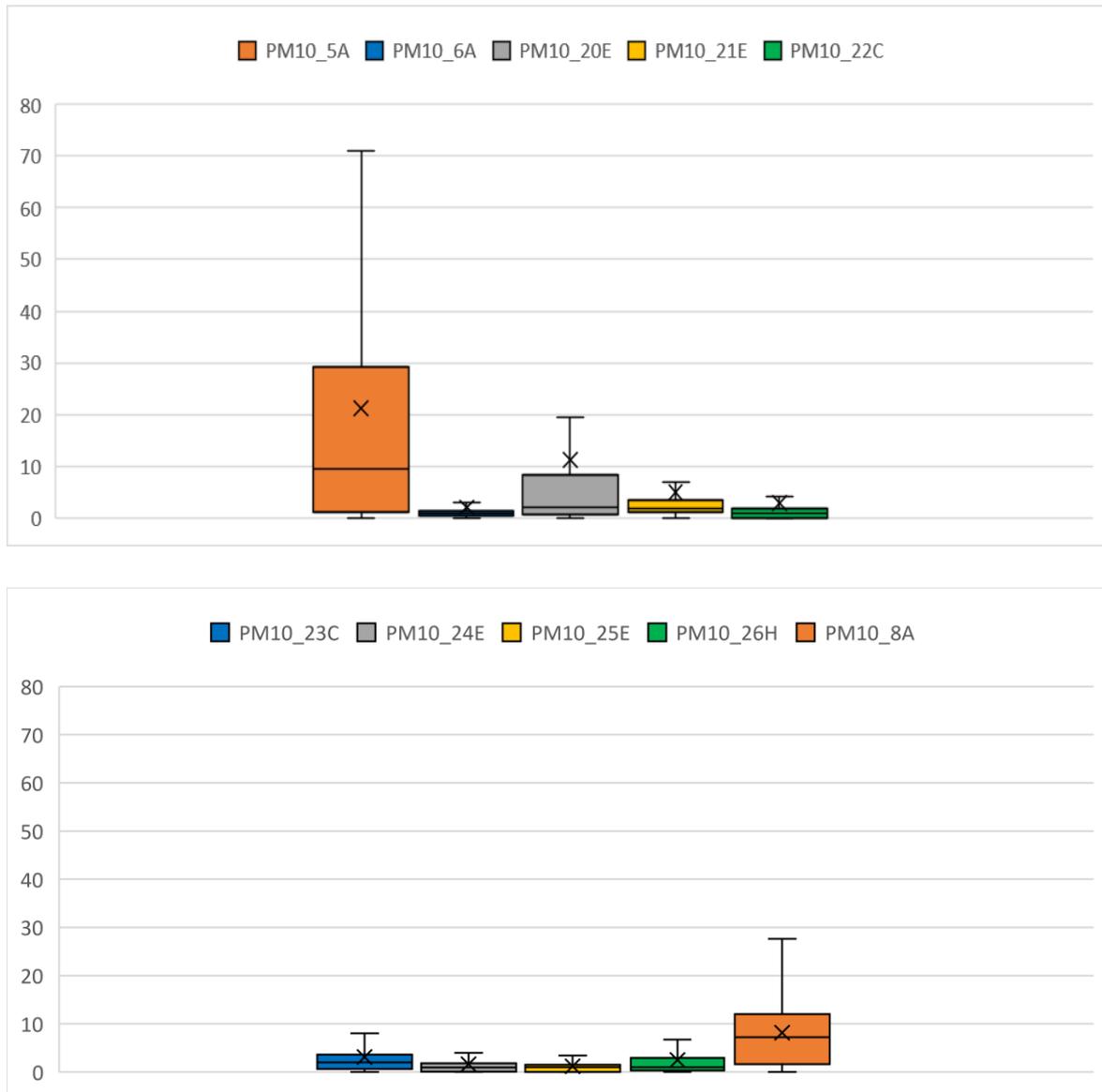


Figura 25 - Distribuzione statistica della concentrazione di PM10 per il mese di agosto, Blocco C e Blocco D

3.4 Temperatura

In Italia, la normativa che stabilisce le temperature degli ambienti in edifici durante il periodo invernale e le relative tolleranze è il DPR 26 agosto 1993, n. 412 [32]. Essa definisce una temperatura limite e relative tolleranze in base alla tipologia di edificio, con l'obiettivo di fornire un ambiente adeguatamente riscaldato per il mantenimento di condizioni di comfort e benessere. Questa regolamentazione non mira soltanto a garantire il comfort degli occupanti, ma sottolinea anche l'importanza dell'efficienza energetica, incoraggiando un uso responsabile dell'energia termica. La normativa prevede una temperatura minima pari a 20 °C negli ambienti residenziali, con una tolleranza di 2 °C.

3.4.1 Risultati delle misurazioni di temperature per il mese di marzo

Nel presente paragrafo viene presentata l'analisi delle temperature registrate durante la stagione invernale. L'approfondimento sulle temperature estive e il loro impatto sul comfort termico saranno oggetto di trattazione nel capitolo successivo dedicato al comfort termico adattivo.

Gli appartamenti **20E**, **21E** e **22C** sembrano essere conformi ai requisiti della normativa italiana per gli ambienti residenziali durante il periodo invernale. Infatti, la temperatura media di questi appartamenti supera il limite minimo di 20°C stabilito dalla normativa, garantendo un livello di comfort termico adeguato agli occupanti. Negli appartamenti **5A** e **6A**, invece, la temperatura media è leggermente al di sotto del limite dei 20°C prescritti dalla normativa. La deviazione standard (SD) relativamente bassa in questi appartamenti indica che, nonostante la temperatura media sia vicina al limite, la variabilità delle temperature all'interno degli appartamenti è contenuta. Ciò suggerisce che le temperature al di sotto della media sono comunque vicine alla soglia di conformità. Inoltre, le temperature minime sono superiori al limite di 18°C richiesto dalla normativa. Pertanto, il sistema edificio-impianto funziona bene in relazione al raggiungimento di condizioni di comfort per gli inquilini.

Se consideriamo i quartili, essi mostrano che tutti gli appartamenti presentano una distribuzione equilibrata delle temperature e questo suggerisce che la gestione del riscaldamento all'interno di ciascun appartamento è adeguata, con i dati distribuiti uniformemente intorno alla mediana. Se consideriamo i quartili, essi mostrano che tutti gli appartamenti presentano una distribuzione equilibrata delle temperature e questo suggerisce che la gestione del riscaldamento all'interno di ciascun appartamento è adeguata, con i dati distribuiti uniformemente intorno alla mediana.

Tabella 20 - Valori statistici della temperatura dell'aria interna per il mese di marzo, Blocco C

Appartamento	Media (SD)	Min	Q1	Mediana	Q3	Max
5A	19.4 (0.49)	18.3	19.1	19.4	19.7	20.8
6A	19.2 (0.55)	17.9	18.8	19	19.4	20.9
20E	20.5 (1.23)	17.2	19.5	20.2	21.5	23.1
21E	21.3 (0.65)	19.6	20.8	21.2	21.7	23.2

22C	21.2	20.3	21	21.2	21.5	22.2
	(0.38)					

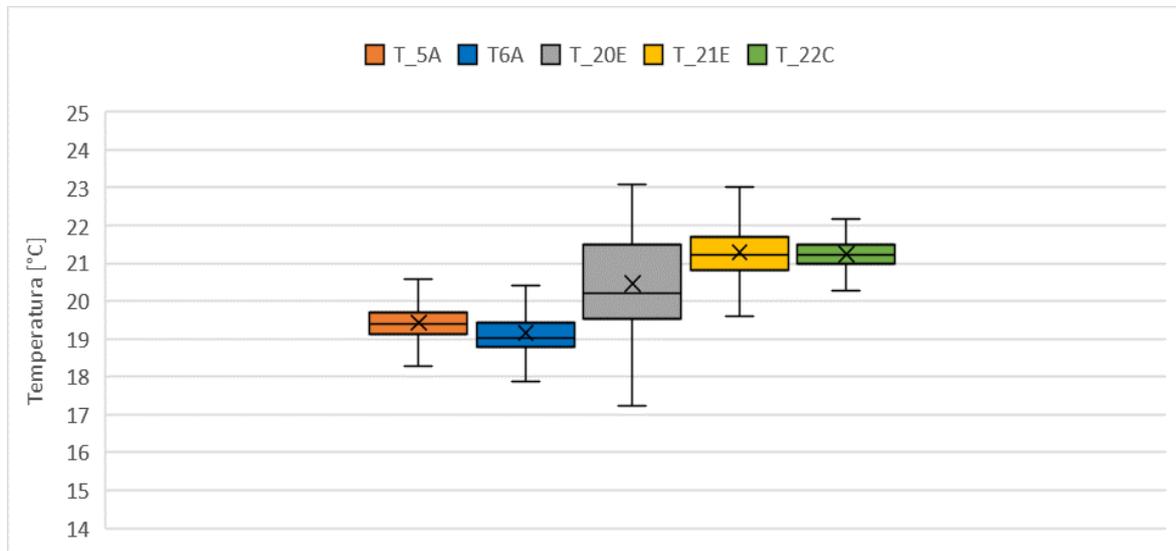


Figura 26 - Distribuzione statistica della temperatura dell'aria interna per il mese di marzo, Blocco C

3.5 Umidità Relativa

L'umidità relativa ottimale per il comfort e la salute umana è generalmente situata tra il 30% e il 70%. Questo intervallo è stato identificato come il più idoneo per minimizzare gli effetti negativi sull'organismo. Scendendo al di sotto del 30%, si possono verificare problemi come secchezza delle mucose e irritazione agli occhi. D'altro canto, superare il 70% può favorire fenomeni di condensazione e formazione di muffe, danneggiando la struttura dell'edificio e minando la salute degli occupanti.

Studi epidemiologici [33] hanno dimostrato che un'umidità relativa mantenuta tra il 40% e il 70% offre numerosi vantaggi per il benessere e la salute umana negli ambienti interni.

Questo intervallo ottimale contribuisce a:

- **Controllo di Batteri e Virus:** Riducendo la sopravvivenza e la trasmissione di batteri e virus infettivi, aiuta a mantenere un ambiente più sano.
- **Prevenzione dei Funghi:** La maggior parte dei tipi di funghi non può prosperare in ambienti con un'umidità relativa inferiore al 60%, contribuendo a evitare problemi di formazione di muffa.
- **Riduzione degli Acari:** Gli acari, comuni allergeni, sono mantenuti al minimo quando l'umidità relativa è inferiore al 50%.

- **Minimizzazione delle Infezioni Respiratorie:** Studi epidemiologici confermano che l'assenteismo e le infezioni respiratorie sono meno frequenti tra le persone che vivono in ambienti con un'umidità relativa all'interno del range consigliato rispetto a quelli con umidità relativa troppo alta o troppo bassa.

3.5.1 Risultati delle misurazioni di umidità relativa per il mese di marzo

Osservando la distribuzione statistica della umidità relativa nei diversi appartamenti (Tab. 21 e Fig. 27) si può affermare che tutti gli appartamenti sembrano mantenere livelli di umidità relativamente confortevoli, con alcune leggere variazioni. Queste variazioni possono essere influenzate da diversi aspetti legati alle abitudini degli occupanti, alla stagione e a come vengono utilizzati i differenti sistemi di ventilazione. In generale, nessun appartamento presenta criticità.

Appartamento	Media (SD) [ppm]	Min [ppm]	Q1 [ppm]	Mediana [ppm]	Q3 [ppm]	Max [ppm]
5A	57.3 (3.9)	46.2	54.7	57.6	60.5	63.5
6A	52.3 (5.3)	37.6	48.7	52.3	57.3	63.9
20E	54.6 (4.4)	42.2	51.5	55.5	57.7	63.3
21E	51.6 (4.2)	39.7	48.7	52.5	54.8	58.5
22C	53.8 (5.8)	37.7	50.1	54.9	58.35	62.2

Tabella 21 - Valori statistici dell'umidità relativa per il mese di marzo, Blocco C

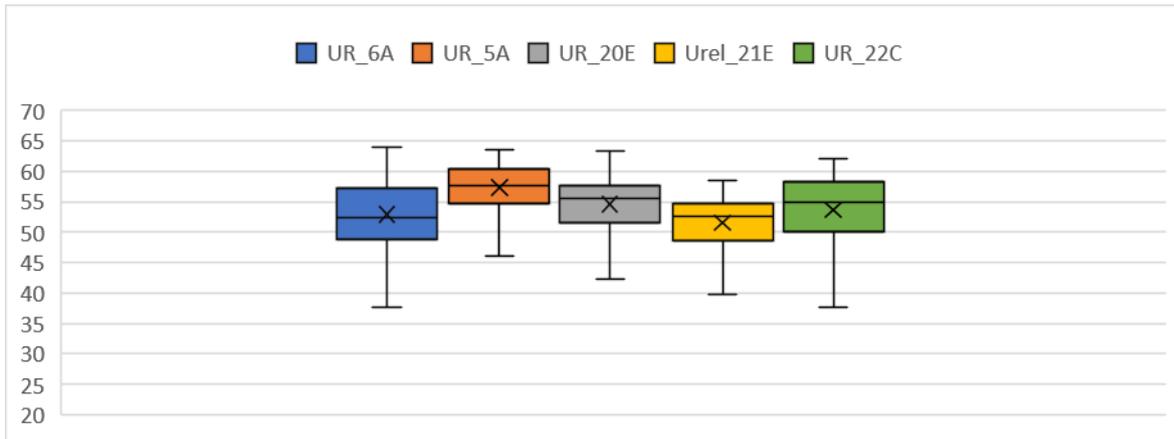


Figura 27 - Distribuzione statistica dell'umidità relativa per il mese di marzo, Blocco C

3.5.2 Risultati delle misurazioni di umidità relativa per la stagione estiva

In generale, l'umidità relativa nei diversi appartamenti sembra essere mantenuta all'interno dell'intervallo ottimale, indipendentemente dal tipo di sistema di ventilazione. Infatti, tutti presentano un'umidità relativa media molto vicina alla mediana, il che suggerisce una distribuzione relativamente uniforme dei dati e in tutti i casi, il primo quartile (Q1) è ben al di sopra del limite inferiore dell'intervallo ottimale (30%), mentre il terzo quartile (Q3) è al di sotto del limite superiore (70%). Inoltre, la deviazione standard contenuta indica una bassa variabilità nei dati.

I sistemi con ventilazione naturale, sembrano performare meglio rispetto quelli a ventilazione meccanica. Questa differenza nelle prestazioni potrebbe essere influenzata dal fatto che i sistemi di ventilazione naturale come i camini solari o i lucernari vengano lasciati aperti per periodi più lunghi durante l'estate rispetto all'inverno. Per quanto riguarda gli edifici con ventilazione meccanica, non si dispone di informazioni sul comportamento degli occupanti, in relazione a quanto effettivamente sia stato utilizzato l'impianto e, eventualmente, con quale frequenza.

Tabella 22 - Valori statistici dell'umidità relativa per il mese di agosto, Blocco C e Blocco D

Appartamento	Blocco	Sistema di ventilazione	Media (SD)	Min	Q1	Mediana	Q3	Max
5A	C	VMC doppio flusso	60.4 (2.7)	54.1	59	60.6	62.4	64.7
6A	C	VMC singolo flusso	60.5 (3.04)	52.5	58.6	60.8	62.8	66.9
8A	D		54.5 (4.78)	41.8	51.7	54.5	58.5	63.9
20E	C	Ventilazione naturale con camino solare	57.3 (4.86)	42.2	54.6	58.1	60.6	65.5
24E	D		53.2 (3.32)	44.1	56	53.3	51	59
21E	C		51.8 (4.57)	43.9	48.9	52.4	54.8	55
25E	D		50.8 (4.21)	39.8	48.1	50.7	54.1	59.5
22C	C		54 (4.74)	51.3	50.1	54.7	57.3	62.4
23C	D	Ventilazione naturale con lucernario	54.5 (4.95)	42.3	50.3	55.1	58	64.5
19D	C		57.2 (4.3)	44.5	54.5	57.2	61.2	64.2
26H	D		52.8 (5.98)	36.1	58.1	53.1	49.2	63.5

Si riporta solamente la distribuzione statistica (Fig.28) relative al Blocco C

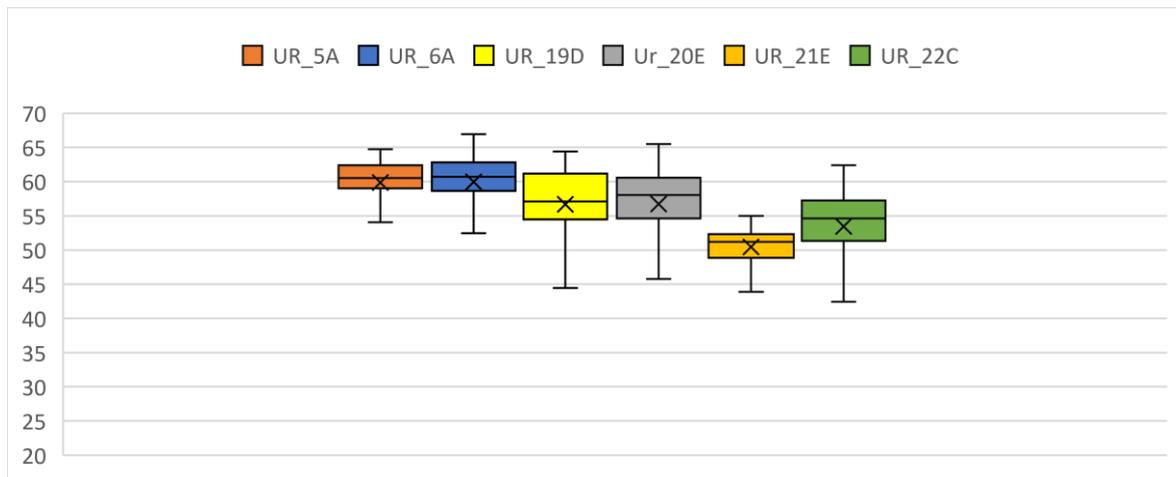


Figura 28 - Distribuzione statistica dell'umidità relativa per il mese di agosto, Blocco C

3.6 Modello del comfort termico adattivo

Per la valutazione del comfort termico estivo degli edifici oggetto di studio, che non sono dotati di impianti di raffrescamento, non è opportuno applicare il modello di Fanger, in quanto esso è applicabile a edifici climatizzati con sistemi attivi. Quindi la valutazione del comfort estivo è basata sul modello del comfort termico adattivo.

Il modello del comfort termico adattivo, come definito nella norma UNI EN 16798-1:2019 [14], è un approccio che si concentra sulla previsione del comfort termico in condizioni non controllate, ed è particolarmente rilevante per l'analisi durante la stagione estiva.

L'applicazione di tale approccio è possibile solamente se i seguenti requisiti risultano essere soddisfatti:

- Non sono presenti sistemi di raffrescamento e riscaldamento;
- Gli occupanti sono impegnati in attività sedentarie;
- Gli occupanti hanno la possibilità adattarsi alla temperatura modificando il proprio abbigliamento, aprendo finestre, regolando tende ombreggianti ecc...
- La temperatura esterna continua media giornaliera è compresa tra 10 °C e 33 °C.

Esso è quindi adatto come riferimento nella stagione estiva per il caso studio in esame, con edifici residenziali in cui non sono previsti sistemi raffrescamento, in alcuni dei quali la ventilazione è naturale.

Il modello considera la capacità degli individui di adattarsi al clima prevalente in un determinato ambiente. L'adattamento può manifestarsi attraverso tre diversi meccanismi:

1. **PSICOLOGICO**: le esperienze pregresse influenzano la risposta degli individui agli stimoli climatici esterni. Quindi le esperienze passate influiscono sulla percezione del comfort termico.
2. **FISIOLOGICO**: questo meccanismo entra in gioco nel momento in cui si trascorre un periodo prolungato in una particolare condizione climatica, il corpo umano può adattarsi gradualmente a tali condizioni climatiche.
3. **COMPORAMENTALE**: in questo caso l'individuo agisce attivamente per modificare il bilancio termico del proprio corpo. Questo può includere azioni come modificare il proprio vestiario, aprire finestre, regolare tende ombreggianti, ecc....

3.6.1 Metodologia

Tale modello si fonda sull'ipotesi fondamentale che la temperatura di comfort all'interno di un edificio è influenzata dalla temperatura esterna dei giorni precedenti, e viene calcolata con la seguente formula:

$$\vartheta_c = 0.33 * \vartheta_{rm} + 18.8 + \Delta\vartheta_c \quad (1)$$

Dove:

ϑ_c temperatura operativa di comfort interna [°C];

ϑ_{rm} temperatura esterna continua media giornaliera (*running mean outdoor temperature*) [°C], che rappresenta la “memoria termica”;

Vengono inoltre definite i cosiddetti “range di accettabilità” $\Delta\vartheta_c$ [°C], che rappresentano gli scarti di temperatura accettabili rispetto a ϑ_c per garantire un certo livello di comfort:

Tabella 23 - Categorie di comfort del modello del comfort termico adattivo

CATEGORIA I	$\Delta\vartheta_c = +2/-3 \text{ } ^\circ\text{C}$
CATEGORIA II	$\Delta\vartheta_c = +3/-4 \text{ } ^\circ\text{C}$
CATEGORIA III	$\Delta\vartheta_c = +4/-5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Ovviamente esistono differenti modelli, oltre quello europeo presente in UNI EN 16798-1:2019, che riflettono le diverse condizioni climatiche e le preferenze culturali nelle diverse regioni del mondo. In India, ad esempio, dove le estati sono tendenzialmente molto calde, il

modello adattivo considera confortevoli temperature più elevate. Quindi, la temperatura di comfort interna e il range di accettabilità saranno meno stringenti, riflettendo la maggiore tolleranza alle temperature elevate della popolazione locale.

La temperatura esterna media può essere calcolata tramite l'equazione:

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \sum(\alpha^{(j-1)} \cdot \theta_{ed,j}) \quad (2)$$

Dove:

- α Valore costante tra 0 e 1 (0,8 valore consigliato);
- $\theta_{ed,j}$ Temperatura esterna media giornaliera del j-esimo giorno precedente [°C].

Riferendo la precedente equazione ad un periodo di sette giorni si ottiene:

$$\theta_{rm} = \sum_{j=1}^7 (\alpha^{(j-1)} \cdot \theta_{ed,j}) \sum(\alpha^{(j-1)}) \quad (3)$$

La quale può ulteriormente essere semplificata, tramite approssimazione alla prima cifra decimale:

$$\theta_{rm} = \frac{\theta_{ed,1} + 0,8 \cdot \theta_{ed,2} + 0,6 \cdot \theta_{ed,3} + 0,5 \cdot \theta_{ed,4} + 0,4 \cdot \theta_{ed,5} + 0,3 \cdot \theta_{ed,6} + 0,2 \cdot \theta_{ed,7}}{3,8} \quad (4)$$

Un limite nell'analisi effettuata risiede nel fatto che il modello adattivo valuta il comfort rispetto alla temperatura operante interna; a causa della mancanza di dati misurati sulle temperature superficiali delle pareti e, quindi, di un'indicazione sulla temperatura media radiante, per il caso studio è stato utilizzato la temperatura dell'aria interna.

3.6.2 Risultati

Per confrontare le prestazioni in termini di comfort termico nei mesi estivi (giugno, luglio e agosto) tra tutti e dodici gli alloggi nei due blocchi, si mostrano le nuvole di punti (Fig.29,31,33,35,37,39) e per quanto tempo sul periodo monitorato si verifica un livello di comfort corrispondente ad una certa categoria (Fig.30,32,34,36,38,40)

I risultati mostrano chiaramente che sia la ventilazione naturale che la meccanica, non sono in grado di sostituire completamente i sistemi di condizionamento tradizionali, ma può rappresentare una parte significativa della soluzione per ridurre il consumo energetico degli

edifici. Infatti, nonostante il modello del comfort termico adattivo offra dei range previsti di comfort più ampi, si individuano alcune criticità nei mesi di luglio e agosto; giugno, invece, non risulta problematico (Fig.29,30,35,36) poiché le temperature medie sono state piuttosto moderate nel 2023, con valori attorno ai 22-23°C.

Nei mesi di luglio e agosto, si è notato che gli appartamenti situati ai piani superiori dotati di ventilazione naturale, tendono a sperimentare un maggiore disagio termico. Questa situazione non è principalmente dovuta al tipo di sistema di ventilazione, ma piuttosto al fatto che questi appartamenti sono maggiormente esposti alla radiazione solare, la quale costituisce un carico termico significativo nella stagione estiva. Gli appartamenti situati al piano terra, identificati come unità abitative 5A, 6A, 7A, e 8A, hanno il vantaggio di essere protetti dalla struttura sovrastante, costituita dai duplex ubicati al piano superiore. Durante le ore più calde della giornata, questo comporta notevoli benefici in termini di mitigazione del surriscaldamento interno. Infatti, osservando Fig.32,34,38,40, è evidente che questi alloggi rientrano nelle categorie di comfort inferiori per un numero maggiore di ore durante il periodo di monitoraggio rispetto alle altre unità residenziali.

L'efficacia di questi sistemi di raffrescamento passivi, in genere, risulta essere più rilevante in zone caratterizzate da elevate escursioni termiche giornaliere, cioè, caratterizzate da grandi differenze tra la temperatura massima e minima giornaliera. La norma UNI 10349 – 2, riporta i valori di ampiezza massima di temperatura per le diverse zone climatiche italiane (Tab 24).

Tabella 24 - - Escursione termica per le diverse zone climatiche in Italia. Vigonza è in zona E.

ZONA CLIMATICA	AMPIEZZA MASSIMA DI TEMPERATURA ESTIVA
A	16 °C
B	14 °C
C	12 °C
D	10 °C
E	8 °C
F	6 °C

Vigonza, che si trova in zona E, risulta essere interessata da un'escursione termica piuttosto limitata, e questo si traduce in possibilità limitate di sfruttare il raffrescamento notturno.

Analisi parametri ambientali

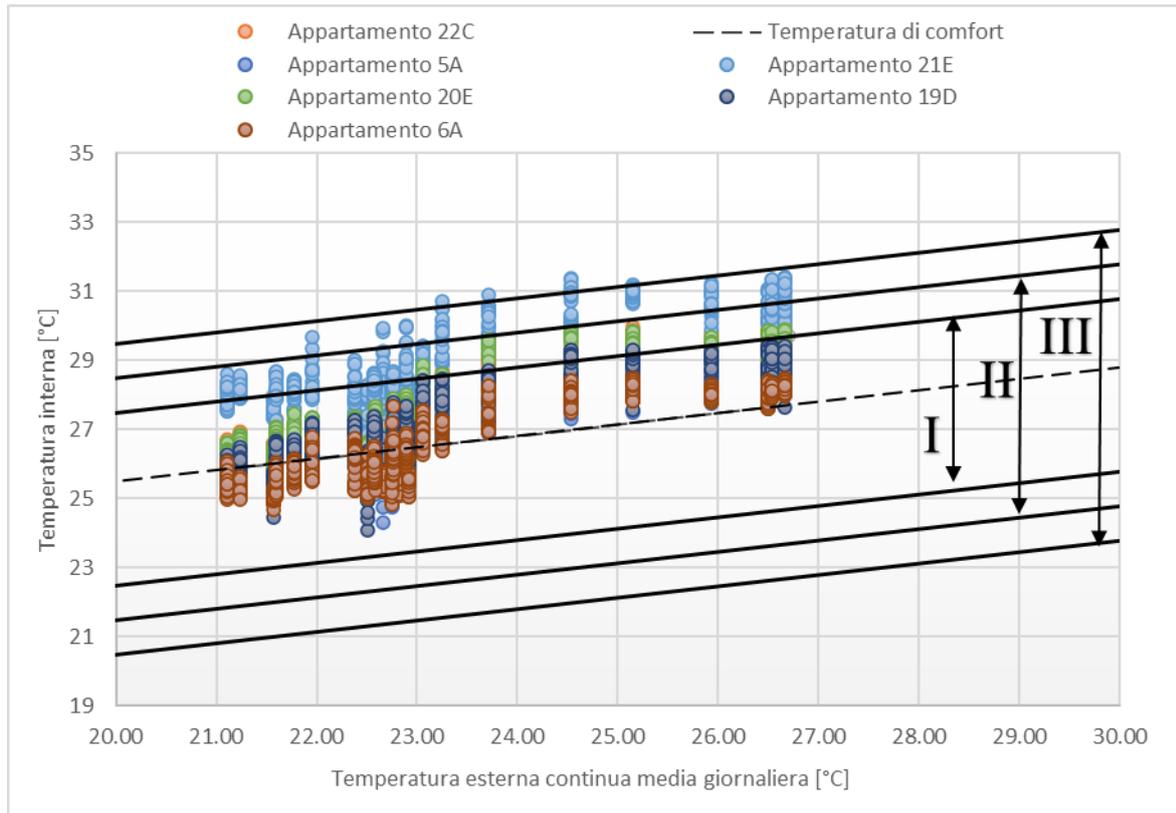


Figura 29 - Rappresentazione delle temperature monitorate negli alloggi del Blocco C rispetto alla temperatura esterna continua media giornaliera per il mese di giugno.

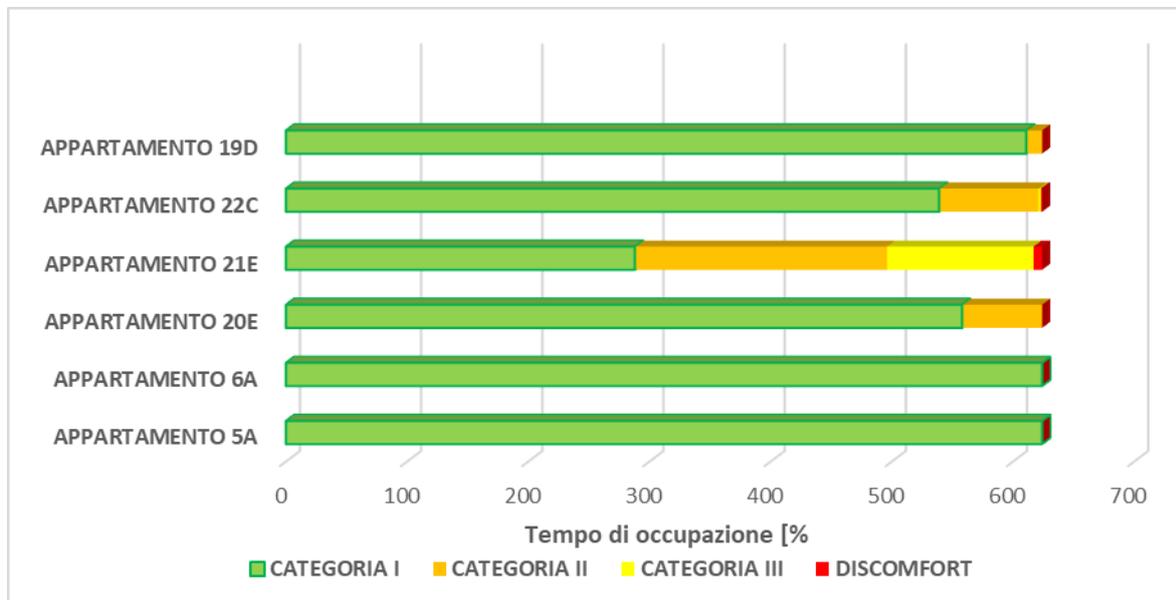


Figura 30 - Rappresentazione delle temperature monitorate negli alloggi del Blocco C rispetto alla temperatura esterna continua media giornaliera per il mese di giugno.

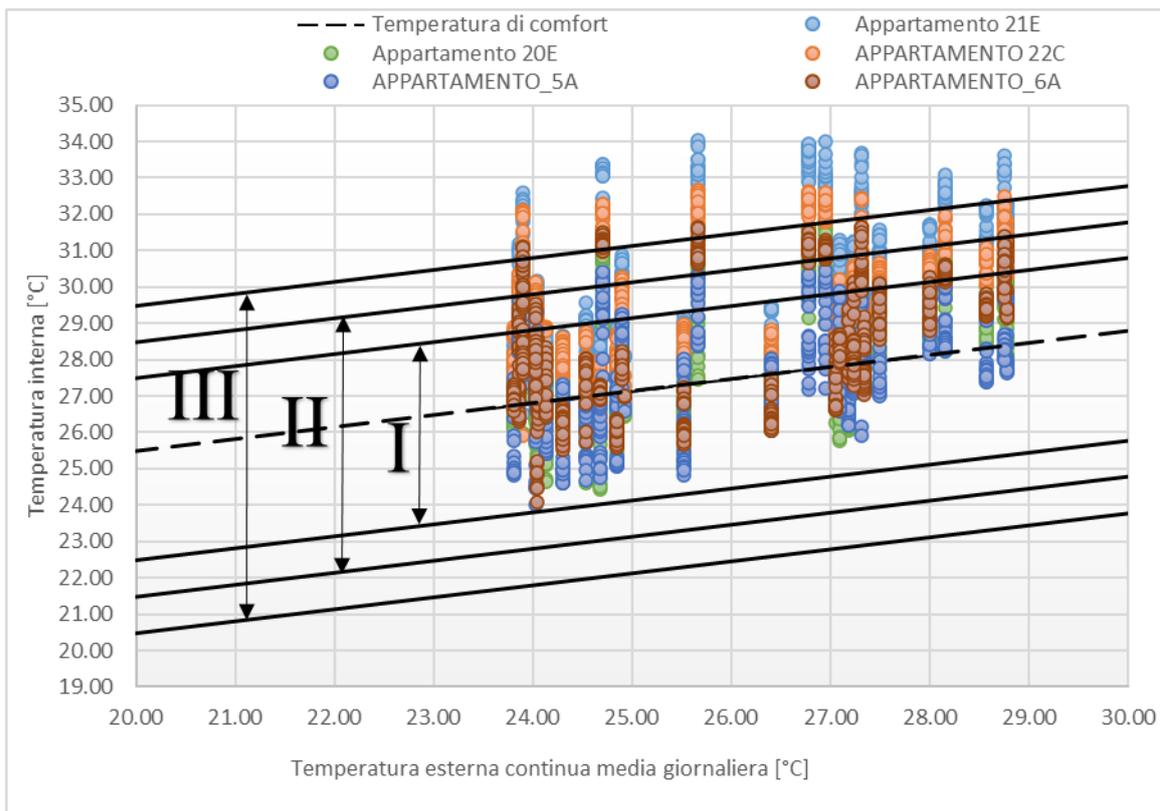


Figura 31 - Rappresentazione delle temperature monitorate negli alloggi del Blocco C rispetto alla temperatura esterna continua media giornaliera per il mese di luglio

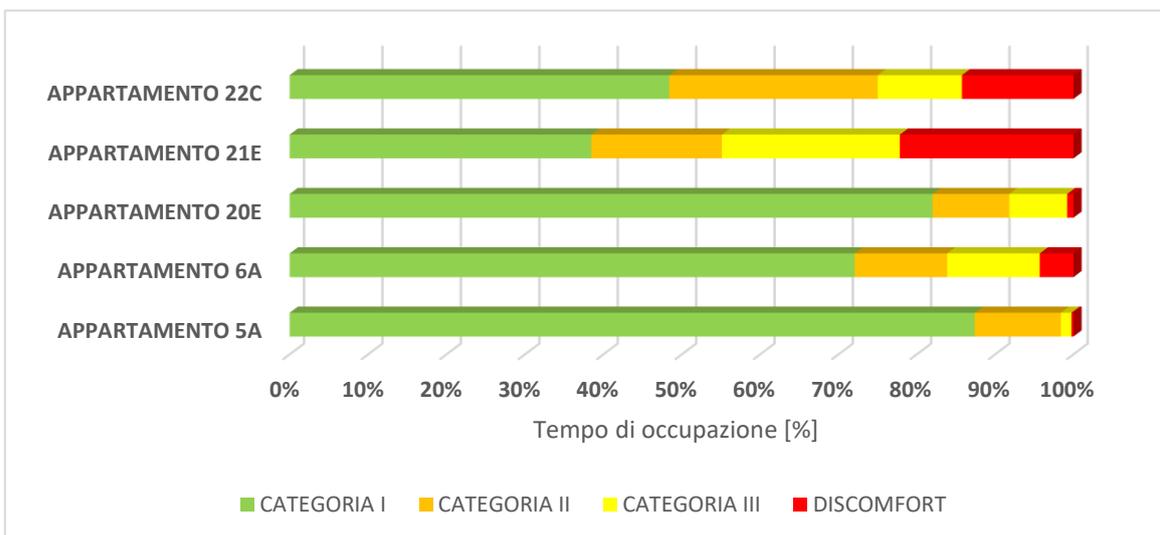


Figura 32 - Rappresentazione grafica delle ore di occupazione divise per categoria di comfort adattivo in alloggi del Blocco C per il mese di luglio.

Analisi parametri ambientali

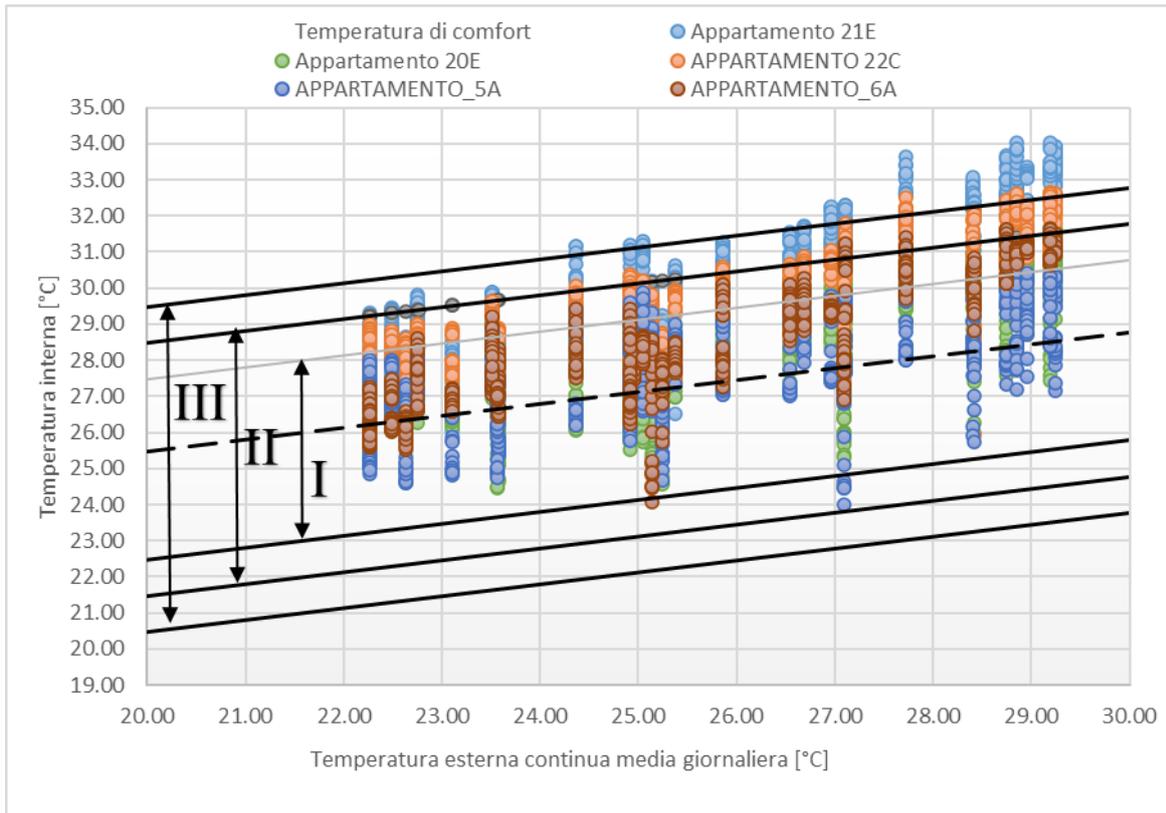


Figura 33 - Rappresentazione delle temperature monitorate negli alloggi del Blocco C rispetto alla temperatura esterna continua media giornaliera per il mese di agosto.

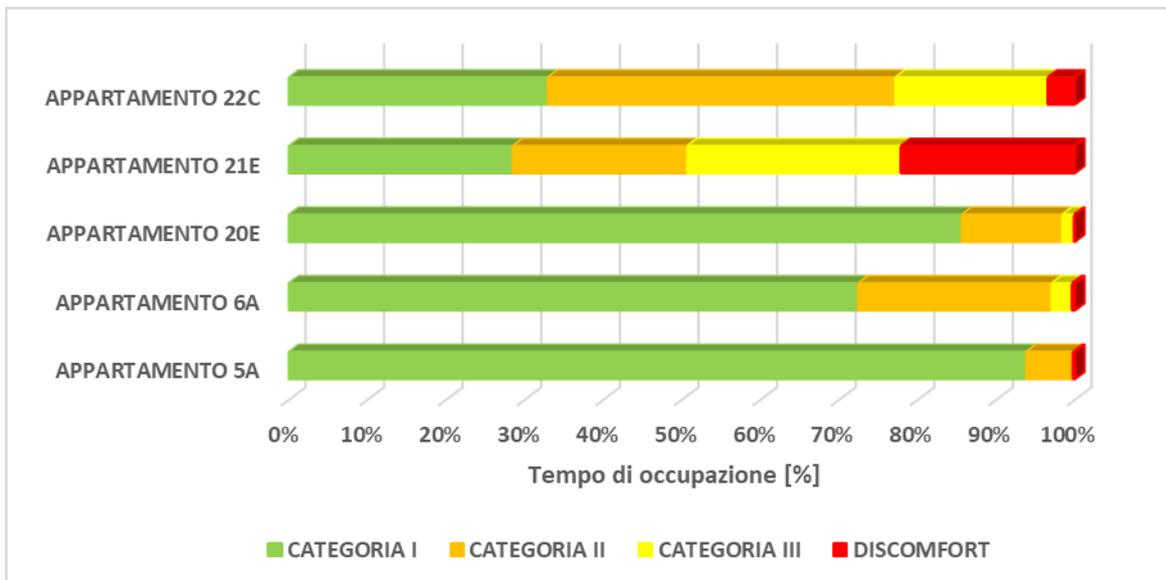


Figura 34 - Rappresentazione grafica delle ore di occupazione divise per categoria di comfort adattivo in alloggi del Blocco C per il mese di agosto. Dati di monitoraggio per l'alloggio 19D non disponibili a causa di problemi riscontrati con il sistema di monitoraggio

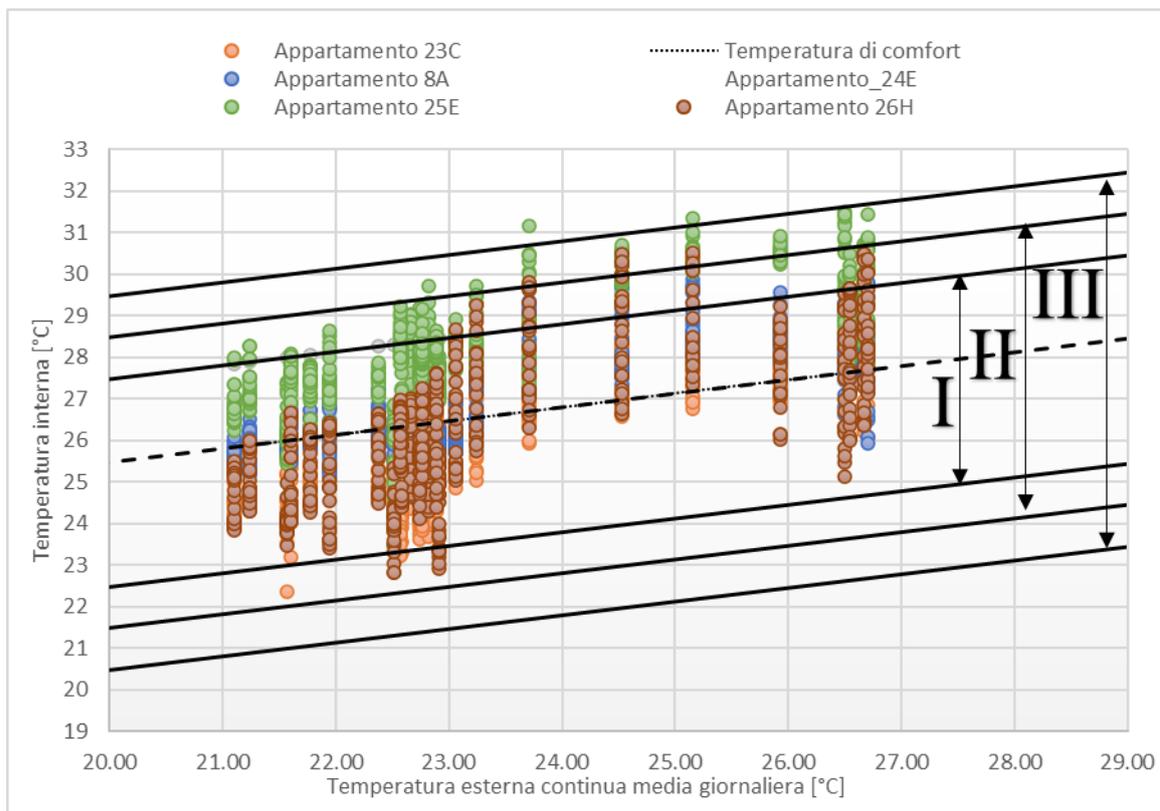


Figura 35 - Rappresentazione delle temperature monitorate negli alloggi del Blocco D rispetto alla temperatura esterna continua media giornaliera per il mese di giugno. Escluso appartamento 7A per mancanza di dati di monitoraggio

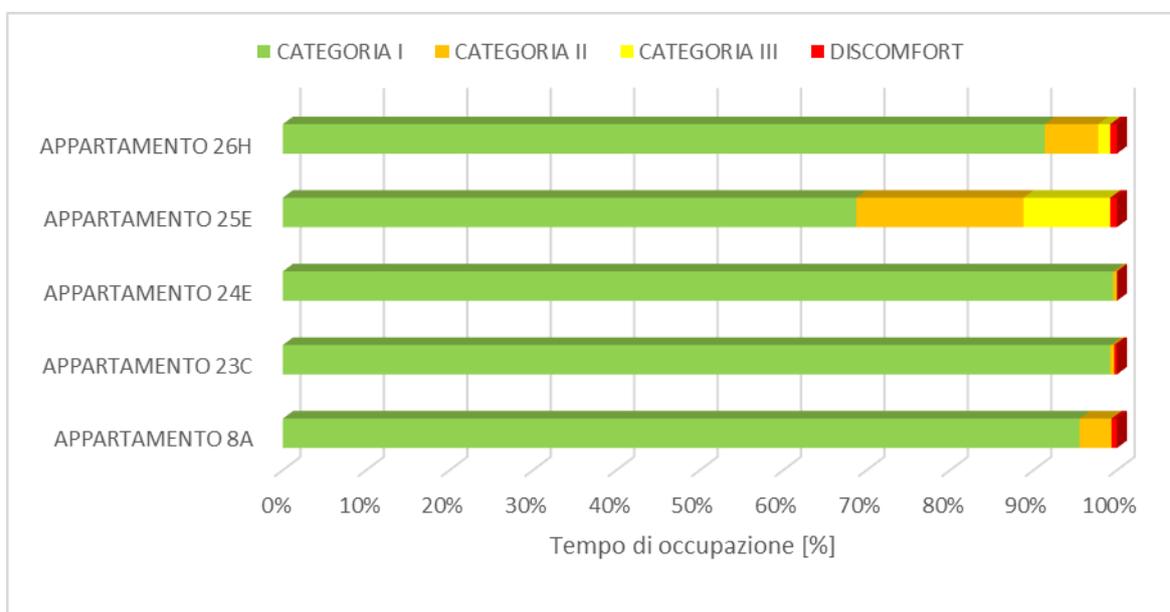


Figura 36 - Rappresentazione grafica delle ore di occupazione divise per categoria di comfort adattivo in alloggi del Blocco D per il mese di giugno.

Analisi parametri ambientali

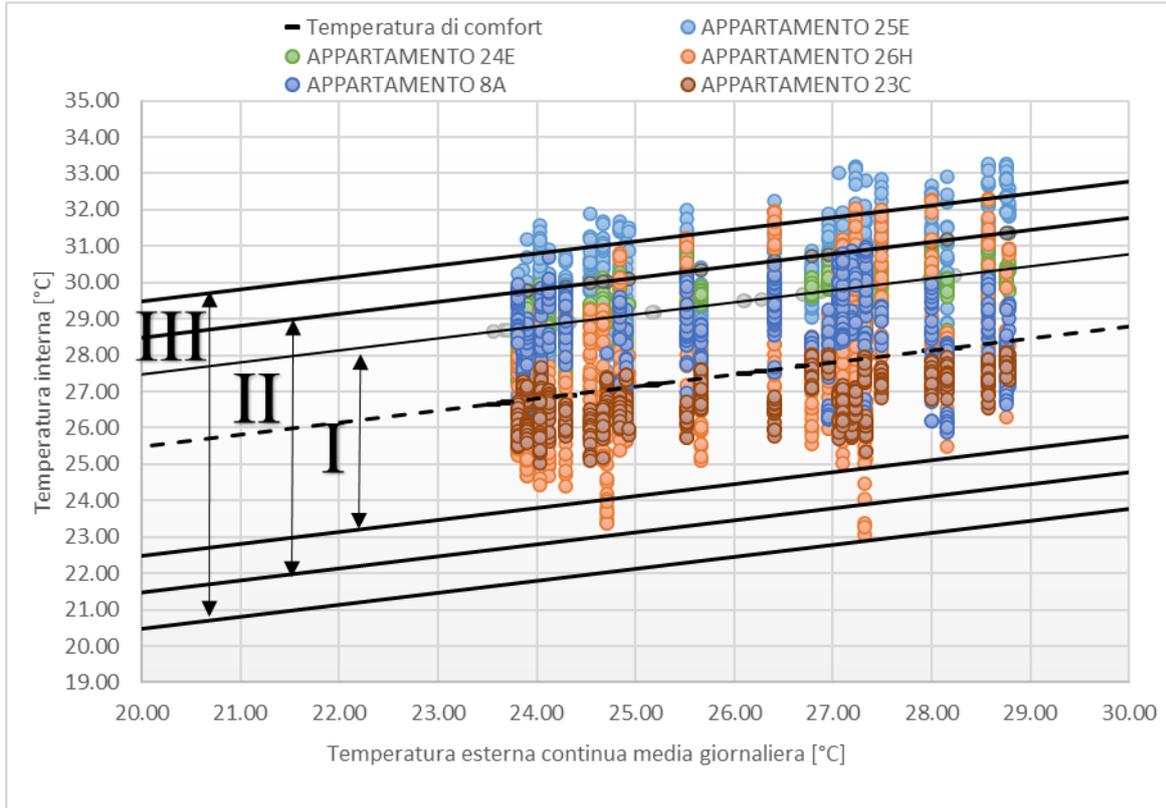


Figura 37 - Rappresentazione delle temperature monitorate negli alloggi del Blocco D rispetto alla temperatura esterna continua media giornaliera per il mese di luglio. Escluso appartamento 7A per mancanza di dati di monitoraggio

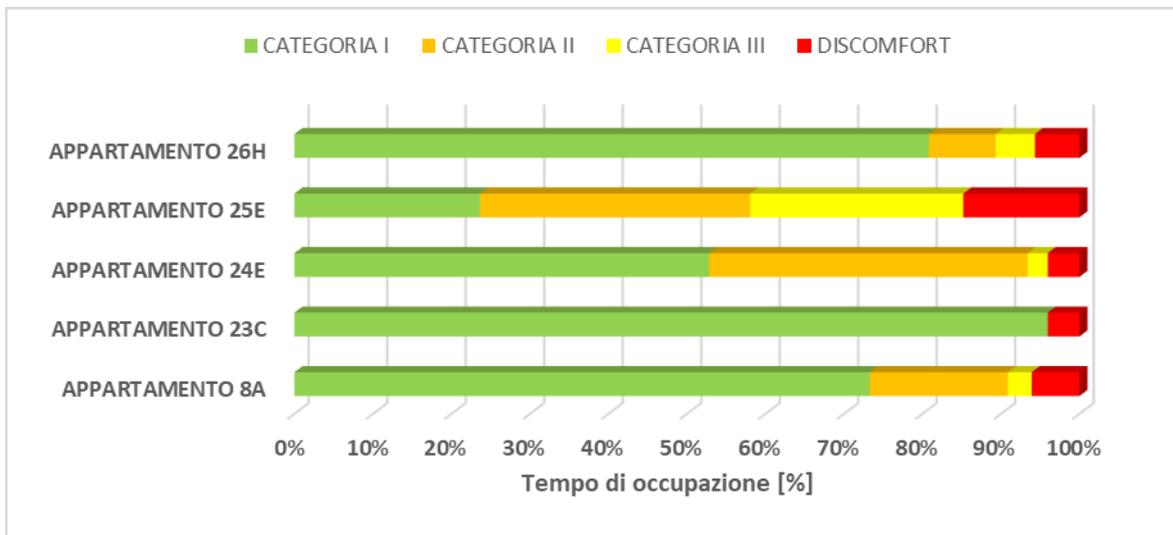


Figura 38 - Rappresentazione grafica delle ore di occupazione divise per categoria di comfort adattivo in alloggi del Blocco D per il mese di luglio.

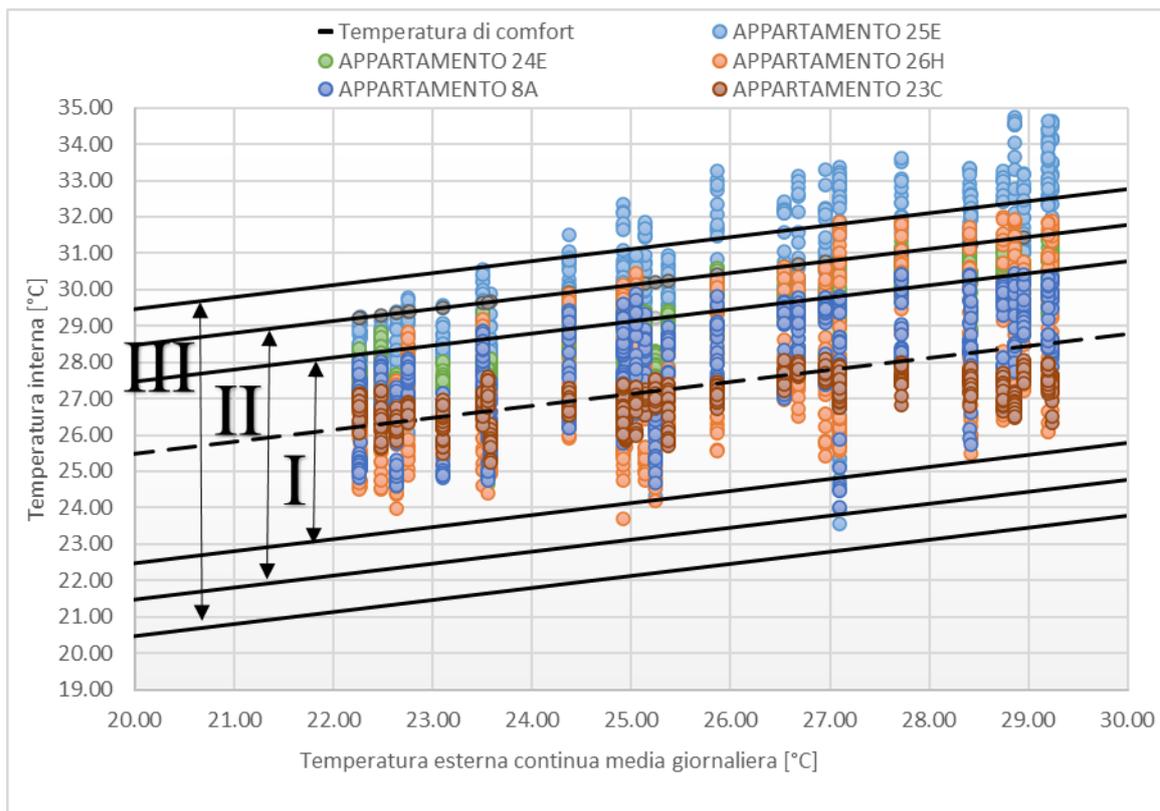


Figura 39 - Rappresentazione delle temperature monitorate negli alloggi del Blocco D rispetto alla temperatura esterna continua media giornaliera per il mese di agosto. Escluso appartamento 7A per mancanza di dati di monitoraggio

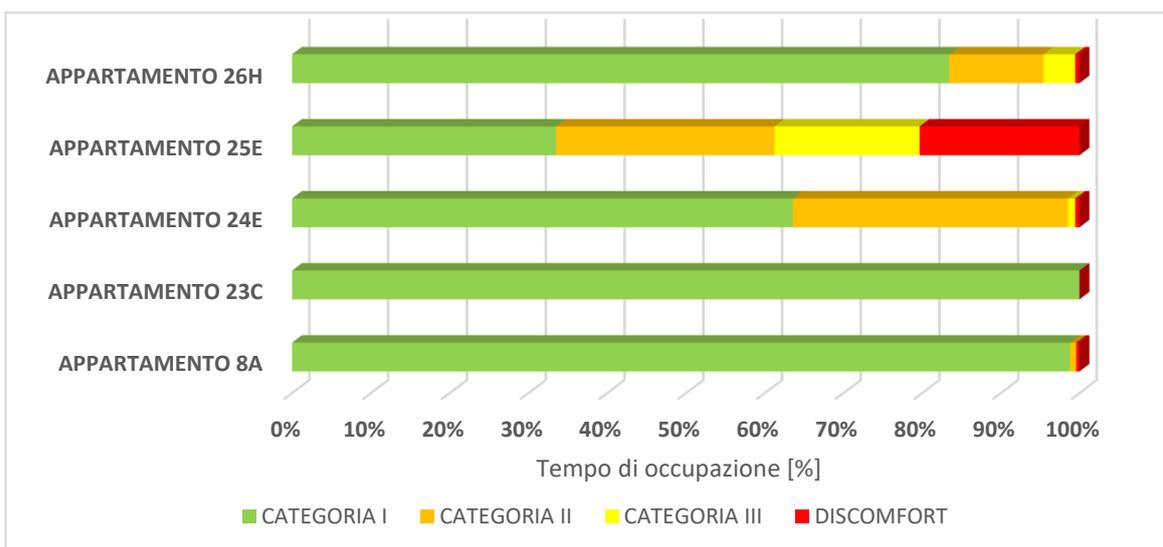


Figura 10 - Rappresentazione grafica delle ore di occupazione divise per categoria di comfort adattivo in alloggi del blocco D per il mese di agosto

3.7 Analisi dei consumi elettrici

Nel contesto della nostra analisi dati, oltre all'analisi dei parametri ambientali, risulta fondamentale anche comprendere e valutare il consumo energetico dei diversi alloggi. Per raggiungere questo obiettivo, si è deciso di confrontare i profili medi orari di prelievo di energia elettrica rilevati nei mesi di marzo, per la stagione invernale, e giugno, luglio e agosto, per la stagione estiva, con i dati rilevati da ARERA (Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente) [34], per la medesima località e potenza impegnata. Questo approccio ci consente di convalidare l'accuratezza e la rappresentativa dei dati che abbiamo raccolto. Verificando la coerenza tra i nostri dati e quelli forniti da ARERA, possiamo confermare la validità del sistema di monitoraggio e garantire che riflettano il comportamento energetico degli appartamenti in esame in maniera affidabile. Inoltre, il confronto ci permette di valutare le prestazioni di questi appartamenti rispetto a dati di riferimento.

3.7.1 Metodologia di confronto

Gli edifici sotto analisi, situati a Vigonza, si distinguono per l'impiego di sistemi completamente elettrici, comprese le pompe di calore utilizzate per il riscaldamento, e presentano una potenza impegnata maggiore di quella classica da 3.3 kW. Quindi si sono presi come riferimento i dati relativi alla provincia di Padova e con potenza impegnata tra 4.5-6 kW.

Va sottolineato che, al momento dell'analisi, i dati relativi al 2023 non erano ancora disponibili da ARERA; pertanto, si è fatto riferimento ai dati più recenti forniti dall'ente regolatore, che risalgono al 2022.

Inoltre, quando si dispone di un campione più grande, come nel caso dei dati ARERA che rappresentano un'ampia popolazione di consumatori, in questo caso tutta la provincia di Padova, è probabile che la variabilità intrinseca nei dati venga attenuata o bilanciata in qualche misura. Questo può comportare una maggiore stabilità nella media dei dati. Infatti, in un campione più grande, c'è una maggiore probabilità di catturare una vasta gamma di comportamenti di consumo energetico. Alcuni utenti potrebbero essere più energivori in determinati momenti della giornata, mentre altri di meno. Queste variazioni estreme tendono a "compensarsi" tra loro quando si calcola la media su un ampio campione. Le "anomalie" o i comportamenti di consumo estremi che potrebbero essere evidenti in un campione più piccolo tendono a essere meno influenti quando si dispone di dati da un numero significativamente maggiore di utenti.

3.7.2 Analisi periodo invernale

Dai profili medi orari ottenuti [Fig.41], sembra che ci siano differenze significative nei consumi tra il profilo medio aggregato dei dodici appartamenti e il profilo ARERA. Ad esempio, nelle ore di punta, cioè durante le prime ore della mattina e alla sera, il consumo risulta essere sempre inferiore rispetto a quello fornito da ARERA, con eccezione durante l'orario di pranzo. Infatti, si può notare un picco di potenza nei profili di consumo energetico tra le 12:00 e le 13:00 in diversi mesi dell'anno, che generalmente è l'orario di pranzo comune per molte persone. Durante questo periodo, molte famiglie preparano il pranzo, usano elettrodomestici come forni elettrici o piani cottura, e consumano energia per cucinare i pasti. Questo può causare un picco di consumo energetico, soprattutto in queste tipologie di alloggi completamente elettrificati. In generale, però, il profilo feriale ottenuto dall'aggregato degli appartamenti è il classico profilo a "doppia gobba", rappresentanti i picchi di consumo di energia, che si verificano di solito in coincidenza con i momenti in cui la popolazione è più attiva e impegnata nelle attività quotidiane, separate da un periodo di consumo energetico più basso durante le ore notturne.

- **Primo picco mattutino:** Questo è il primo picco di consumo di energia elettrica che si verifica di solito al mattino, spesso tra le ore 7:00 o 9:00. Durante questa prima gobba, le persone si svegliano, preparano la colazione, si vestono e iniziano a lavorare o a svolgere altre attività quotidiane che richiedono l'uso di apparecchi elettrici come fornelli, asciugacapelli, computer, ecc.
- **Periodo Intermedio:** Tra la prima e la seconda gobba, di solito ci sono ore in cui il consumo energetico è più basso. Questo periodo corrisponde alla parte centrale della giornata, quando molte persone sono al lavoro o a scuola e i loro consumi domestici sono ridotti. Durante questo periodo, il consumo di energia elettrica viene mantenuto costante. Nel nostro caso abbiamo un picco in corrispondenza dell'orario di pranzo, probabilmente dovuto all'uso dei fornelli a induzione.
- **Picco serale:** La seconda gobba si verifica di solito nel tardo pomeriggio o nella serata, intorno alle 19:00. Durante questa fase, le persone tornano a casa dopo il lavoro o la scuola, iniziano a cucinare la cena, guardare la televisione e utilizzare altri elettrodomestici. Questo porta a un aumento significativo del consumo di energia.
- **Periodo Notturno:** Durante le ore notturne, il consumo di energia è tipicamente al suo minimo, con solo alcuni dispositivi a basso consumo energetico in funzione, come l'illuminazione notturna e gli apparecchi elettronici in modalità standby.

Nei weekend, il grafico (Fig.41) presenta una distribuzione leggermente diversa. Il primo picco mattutino risulta essere più bassa rispetto ai giorni feriali, poiché molte persone hanno più tempo libero e potrebbero rimanere a casa più a lungo. La seconda gobba serale rimane comunque evidente, ma il consumo di energia rimane più uniformemente distribuito durante il giorno.

3.7.3 Analisi periodo estivo

Il confronto tra i profili di consumo energetico dei dodici appartamenti aggregati e i dati ARERA per giugno ha rivelato differenze significative nei consumi energetici [Fig.41]. Queste differenze sono attribuibili in gran parte all'uso di sistemi di raffrescamento passivo negli appartamenti sperimentali, che consentono una notevole riduzione dei consumi elettrici durante i mesi estivi. Questi risultati suggeriscono l'importanza della progettazione e dell'adozione di soluzioni energetiche sostenibili negli edifici al fine di affrontare la crescente richiesta di energia.

Si è provveduto successivamente a effettuare un'analisi dei consumi energetici degli appartamenti, ed è emerso un quadro interessante quando si confrontano i consumi nei mesi di marzo, rappresentativi dell'inverno, e agosto, rappresentativi dell'estate, con i valori ARERA relativi alle utenze con una potenza impegnata compresa tra 4.5 e 6 kW.

Prima di procedere con l'analisi, però, va sottolineato che gli alloggi sperimentali sottoposti a studio sono completamente elettrificati, il che significa che l'energia elettrica viene utilizzata sia per il riscaldamento che per la produzione di acqua calda sanitaria. Questa configurazione differisce notevolmente dai dati ARERA, che includono principalmente edifici dotati di sistemi di riscaldamento diversificati. Secondo i dati forniti dall'Istat per il 2021, in Italia i sistemi di riscaldamento più diffusi comprendono caldaie a gas o petrolio (64.8%), camini e stufe a legna (27.4%), pompe di calore (5.3%) e sistemi elettrici (2.2%).

In questo scenario, i dati ARERA sono principalmente influenzati da sistemi di riscaldamento a combustibili fossili e non catturano completamente il panorama di consumi energetici di alloggi completamente elettrificati, quindi i valori riportati da ARERA sono legati principalmente all'uso di elettrodomestici e, più in generale, apparecchi elettrici.

Quindi, nonostante questa diversità di base, per il mese di marzo i consumi degli appartamenti analizzati tendono a essere, mediamente, inferiori rispetto ai valori ARERA, con alcune eccezioni degne di nota. Infatti, l'appartamento 5A presenta un valore piuttosto

elevato, questo è dovuto al fatto che a causa di un problema alla pompa di calore, è stato installato un boiler elettrico.

Per quanto riguarda il mese di agosto, anche in questo caso i consumi sono sempre inferiori, nonostante questi valori tengano conto anche dell'acqua calda sanitaria, con eccezione dell'appartamento 24E che presenta valori molto elevati (496 kWh), il quale ha installato uno split per la stagione estiva.

In molti edifici, la presenza di sistemi di condizionamento può influenzare il comportamento degli utenti, spingendoli a fare affidamento su tali sistemi anche quando soluzioni più sostenibili, come la ventilazione naturale, potrebbero essere altrettanto efficaci nel mantenere un ambiente confortevole e questo comporta spesso un consumo eccessivo di energia facilmente evitabile. L'appartamento 24E, con il suo elevato consumo durante il mese di agosto, testimonia questo fenomeno.

Al contrario, se prendiamo in considerazione l'appartamento 26H, dotato anch'esso di ventilazione naturale con lucernario e senza split, emerge un quadro notevolmente diverso. Nonostante condivida con l'appartamento 23C la tipologia di ventilazione naturale, l'appartamento 26H mostra un comportamento molto più efficiente. Durante il periodo di agosto, l'appartamento 26H ha riportato un totale di ore in categoria IV (discomfort) pari allo 0%, indicando un elevato livello di comfort, e nel frattempo ha registrato un consumo energetico di soli 204 kWh, che è meno della metà di quello dell'appartamento 23C (496 kWh) (Tab.25).

Tabella 25 - Confronto consumi elettrici (marzo e agosto) tra i dati Arera e quelli monitorati

Anno	Appartamento	BLOCCO	Mar [kWh]	Ago [kWh]
2023	Appartamento 5A	C	554	234
2023	Appartamento 6A	C	138	104
2023	Appartamento 19D	C	-	-
2023	Appartamento 20E	C	183	87
2023	Appartamento 21E	C	344	235
2023	Appartamento 22C	C	384	274
2023	Appartamento 7A	B	308	109
2023	Appartamento 8A	B	396	247
2023	Appartamento 26H	B	289	204
2023	Appartamento 23C	B	245	496
2023	Appartamento 24E	B	-	74
2023	Appartamento 25E	B	343	301
Anno	Potenza impegnata	Residenza	Mar [Kwh]	Ago [Kwh]
2022	1.5<potenza_impegnata<=3	Padova	170	190
2022	3<potenza_impegnata<=4.5	Padova	289	299
2022	4.5<potenza_impegnata<=6	Padova	369	319

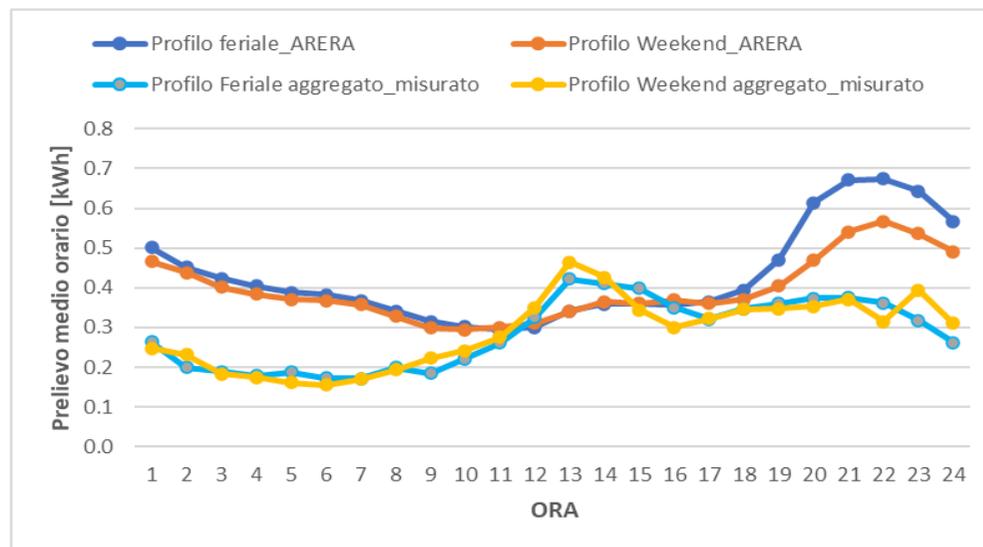
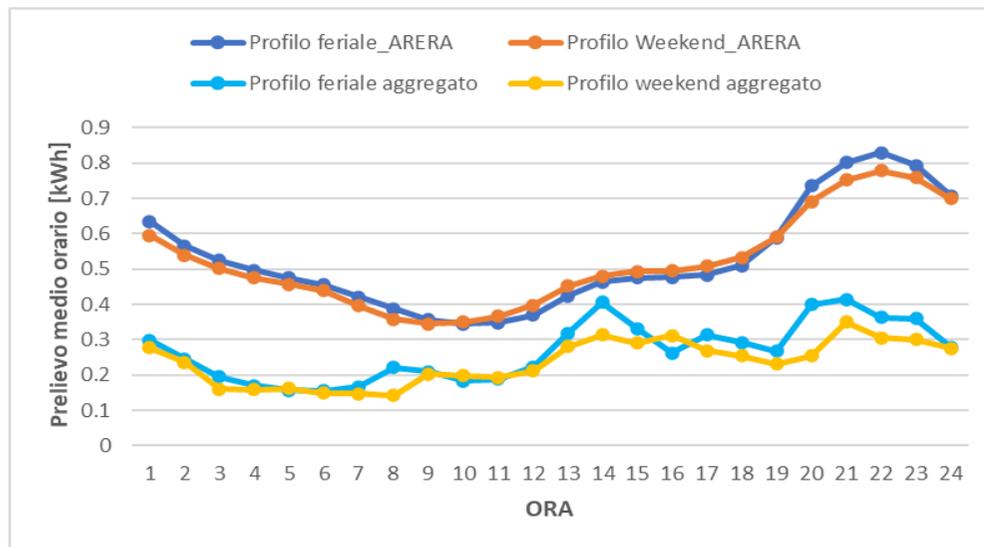
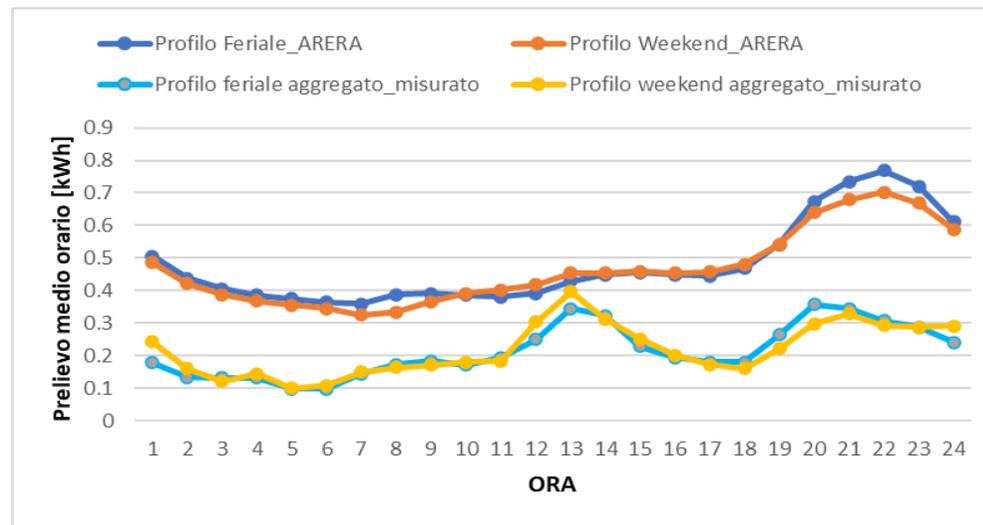
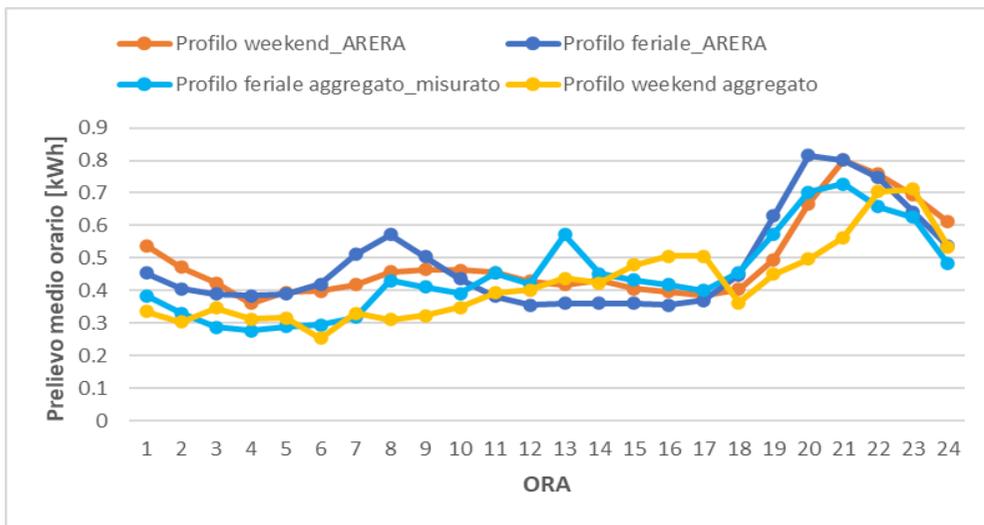


Figura 41 - Confronto profili prelievo medio orario per il mese di marzo, giugno, luglio e agosto (Alto a sx in senso orario)

Capitolo 4

Costruzione del modello energetico di una unità abitativa

Dopo l'analisi approfondita dei dati di monitoraggio energetico e ambientale, in questa seconda parte l'attenzione si sposta verso la costruzione di un modello energetico che simuli adeguatamente il comportamento dinamico di una unità abitativa rappresentativa, appartenente ad uno dei due blocchi edilizi. Nel processo di selezione dell'alloggio tipo per le simulazioni dinamiche, si sono tenuti in conto vari fattori chiave. Infatti, l'obiettivo principale è costruire un modello affidabile, che possa essere utilizzato per analisi future.

Inizialmente è stata effettuata la modellazione di tutti gli appartamenti monitorati, sia per quanto riguarda gli aspetti edilizi che i sistemi di ventilazione meccanica e naturale. Delle dodici unità dei due blocchi edilizi C e D, quelle del secondo presentano dati di monitoraggio durante la stagione invernale incompleti che renderebbero difficile il confronto per la validazione del modello. In secondo luogo, si è preso in considerazione il fatto che gli alloggi al piano superiore, dotati di ventilazione naturale, possono essere interessanti come oggetto di studio del periodo estivo, visto che, inoltre, sono dotati di tetto verde, che attualmente non è ancora cresciuto e quindi si possono trarre poche informazioni da questa soluzione architettonica sull'impatto in termini energetici. Infine, nell'alloggio dotato di ventilazione meccanica a doppio flusso la pompa di calore è stata sostituita con un boiler elettrico, perciò non è adeguato ad essere modellato come appartamento tipo. Alla luce di queste considerazioni, si è scelto di considerare l'appartamento 6A il quale è caratterizzato da completezza di dati e coerenza dei sistemi.

In questo capitolo, vengono esaminati i software impiegati per la modellazione e la simulazione. I programmi in questione sono **Trnsys18** e **CONTAM**, ciascuno con ruoli specifici nel processo di costruzione del modello e analisi.

3.8 TRNSYS

Questo caso di studio ha richiesto la simulazione dinamica del sistema edificio-impianto per esaminarne in dettaglio il comportamento durante la stagione invernale. L'obiettivo principale consiste nel realizzare un modello calibrato basato sui dati raccolti, il quale possa essere utilizzato con affidabilità per effettuare previsioni e future analisi. Per la simulazione e le successive analisi si è scelto di utilizzare il software **TRNSYS** (*TRansient System Simulation program*)[35], il quale consente di analizzare sistemi complessi edificio-impianto in regime dinamico, suddividendo l'analisi in una serie di componenti che interagiscono tra loro (Fig. 50). Il programma comprende un'interfaccia grafica, un ambiente di simulazione (*Simulation Studio*), e una libreria di componenti chiamati *Types* che spaziano dal modello geometrico e costruttivo dell'edificio ai singoli componenti dell'impianto HVAC. Inoltre, TRNSYS permette di interagire con altri software come EXCEL e CONTAM (utilizzato per la rete di ventilazione, come mostrato in seguito).

La simulazione dinamica di ogni sistema in TRNSYS avviene collegando le *Type* tra loro in *Simulation Studio* in base a una logica di input-output (gli output di un componente sono collegati graficamente agli input di un altro). Ogni *Type* può essere considerato una *black box* che elabora dati di input in base ad algoritmi definiti interni, partendo da parametri definiti dall'utente e produce dati di output.

La simulazione è stata eseguita per il solo mese di marzo, poiché è l'unico mese invernale di cui si ha una completezza di dati monitorati, con l'impiego di un time step di 5 minuti, selezionato tenendo in considerazione l'inerzia termica dei sistemi e la loro reattività quando vengono integrati in un unico modello. L'utilizzo di un time step più breve avrebbe potuto portare a una maggiore precisione, ma avrebbe anche aumentato notevolmente la complessità computazionale e la durata complessiva dell'analisi. D'altro canto, un time step più lungo avrebbe potuto comportare una perdita di dettaglio nelle simulazioni, riducendo la capacità di catturare variazioni significative nei comportamenti dinamici dei sistemi.

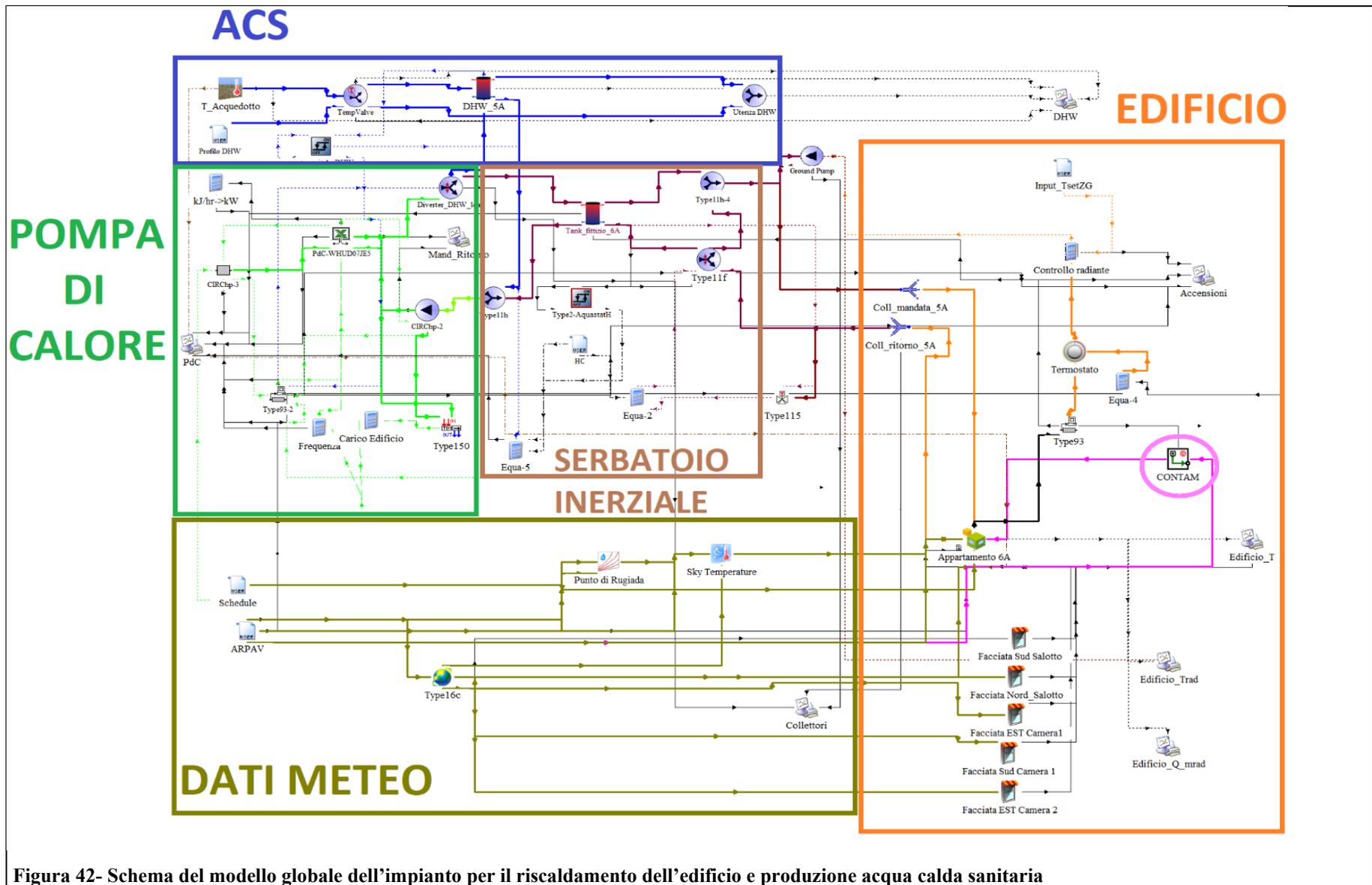


Figura 42- Schema del modello globale dell'impianto per il riscaldamento dell'edificio e produzione acqua calda sanitaria

Il modello globale mostrato in Fig. 42 può essere suddiviso in cinque sottosistemi distinti:

- Lato generazione abbiamo la pompa di calore aria-acqua, simulata attraverso una macro Excel che simula il suo comportamento dinamico a carico parziale a partire dai dati prestazionali a carico 100% forniti dal costruttore. Il funzionamento della pompa di calore dipende dalla temperatura esterna, dalle condizioni dell'acqua di ritorno dai serbatoi e dalla richiesta termica dell'edificio che definisce la frequenza di lavoro.
- Serbatoio di acqua calda sanitaria integrato nella pompa di calore *all-in-one*. Il serbatoio verticale viene suddiviso in nodi isotermici con numerazione da 1 a n, partendo dall'estremità superiore. Viene riscaldata con un set-point di 44 °C e il controllo avviene attraverso il monitoraggio del nodo 2 del serbatoio.
- Serbatoio inerziale introdotto per simulare l'inerzia termica del sistema radiante, anche se non è presente nell'impianto effettivo. L' acqua contenuta all'interno del serbatoio viene riscaldata con un set-point di 35°C (pari alla temperatura di mandata del radiante), e il controllo avviene attraverso il monitoraggio del nodo 2 del serbatoio.
- Sottosistema dei dati meteo che comprende tutte quelle *types* necessarie a simulare le condizioni ambientali esterne basate sui dati orari forniti da ARPAV per la stazione meteo di Legnaro [36]. Questi dati includono informazioni come la temperatura di bulbo secco, la radiazione solare globale sul piano orizzontale, l'umidità relativa, la velocità e la direzione prevalente del vento.
- Lato edificio rappresentato dalla Type56 in *Simulation Studio*, che riguarda la caratterizzazione dell'edificio all'interno di TRNBUILD in termini di geometria e orientazione dell'edificio, proprietà termofisiche dell'involucro, sistema radiante, carichi interni e profili occupazionali.

Ovviamente, ogni sistema è dotato di logiche di controllo che ne simulano il comportamento dinamico e la regolazione.

3.8.1 Modellazione dell'edificio con TRNBUILD

La modellazione dell'edificio è stata realizzata attraverso il TRNBUILD, il quale permette di definire le caratteristiche geometriche e termofisiche, con il limite però di non poter essere supportati da un'interfaccia grafica tridimensionale dell'edificio. Di conseguenza, è stato necessario creare il modello inserendo manualmente tutti i parametri derivati dalle informazioni contenute nelle stratigrafie e planimetrie fornite.

Il TRNBUILD consente di rappresentare l'edificio come un insieme di "zone termiche". Queste zone termiche sono concepite come volumi d'aria caratterizzati da temperatura uniforme (perfetta miscelazione). Nel modello dell'appartamento 6A è stata mantenuta la corrispondenza tra le zone termiche e le zone fisiche dell'edificio, replicando accuratamente le planimetrie. Ogni zona termica è delimitata da superfici verticali e orizzontali, e ciascuna di queste è stata definita in dettaglio. Questa definizione include informazioni sulle dimensioni delle superfici, la stratigrafia delle strutture, l'orientamento, la relazione con altre zone termiche e l'interazione con l'ambiente esterno.

Al fine di mantenere la chiarezza e la concisione nel testo, non verranno riprese le descrizioni dettagliate delle stratigrafie che sono state già fornite nel capitolo 2.

3.8.1.1 Carichi interni e profili di occupazione

Un'apposita sezione permette di definire alcuni parametri dinamici, riguardanti l'utilizzo dell'alloggio stesso, la presenza degli inquilini e l'impiego degli apparecchi elettrici, che influenzano la temperatura e umidità relativa interna. I parametri da impostare sono:

- **Valori Iniziali:** È necessario definire i valori iniziali di temperatura e umidità relativa all'inizio della simulazione. Si è scelto di mantenere valori standard di temperatura a 20°C e un'umidità relativa del 50%. Questa scelta contribuisce a stabilizzare i primi giorni di simulazione, evitando potenziali instabilità causate da valori iniziali discordanti.
- **Infiltrazioni/Ventilazione:** L'alloggio in considerazione è dotato di un sistema di ventilazione meccanica a flusso singolo che estrae l'aria viziata da bagni e cucina, mentre l'ingresso dell'aria avviene attraverso bocchette igrometriche. Il calcolo delle portate di infiltrazione e della distribuzione dell'aria nell'edificio è stato eseguito utilizzando il software CONTAM [42], al quale si rimanda per ulteriori dettagli nell'apposito capitolo dedicato.

- **Heating/Cooling:** Questa funzione è stata disattivata in quanto tutto il sistema è stato costruito in ambiente *Simulation Studio*, quindi fuori dal TRNBUILD.

Inoltre, è possibile implementare delle *schedule* per vari parametri, consentendo la definizione di programmazioni orarie che regolano la variazione di tali parametri nel corso della giornata o dell'anno. Di seguito, sono elencate le schedule utilizzate per regolare l'influenza dei carichi interni nel tempo, derivanti dalla presenza di persone, nonché dall'uso di apparecchi elettrici e luci. L'adozione di queste schedule aumenta significativamente il livello di dettaglio delle simulazioni, consentendo di tener conto delle fluttuazioni nel carico termico interno dell'edificio durante il corso della giornata e dell'anno:

- **Schedule per le persone:** Sono state implementate schedule di occupazione per rappresentare la presenza degli inquilini all'interno dell'alloggio. Ciò consente di stimare con precisione il carico termico interno generato dalla presenza umana.
- **Schedule per l'illuminazione:** Per simulare l'uso delle luci all'interno dell'alloggio, sono state create schedule specifiche. Queste schedule indicano quando le luci vengono accese e spente durante la giornata. In questo modo, è possibile valutare come l'illuminazione contribuisce al carico interno.
- **Schedule per i dispositivi elettrici:** Per quanto riguarda gli apparecchi elettrici, sono state definite delle schedule che rappresentano i momenti in cui tali apparecchi vengono utilizzati. Questi comprendono elettrodomestici, dispositivi elettronici e altre apparecchiature che dissipano calore nell'ambiente circostante. Le schedule permettono di modulare il carico termico interno in base agli orari di utilizzo di queste apparecchiature.

Inoltre, è importante sottolineare che queste schedule sono state ulteriormente differenziate in base a giorni feriali e week-end, alla presenza di adulti e bambini nell'alloggio e alla distinzione tra zona giorno e zona notte.

CARICHI INTERNI: PERSONE

Quando si valuta il contributo termico delle persone all'interno di un ambiente, è importante considerare il flusso di calore totale che esse generano. In media, si stima che ogni adulto produca un flusso di calore di circa 120 W all'interno dell'ambiente, mentre un bambino un valore pari al 75% del carico termico dell'adulto [38]. Questo flusso di calore può essere suddiviso in due componenti: sensibile (58%), che contribuisce direttamente al riscaldamento dell'ambiente, e latente (42%), associato alla generazione di vapore che va ad

incrementare l'umidità dell'aria interna. La componente sensibile può a sua volta essere suddivisa in due parti: convettiva e radiante. Si assume che il 70% del calore sensibile sia convettivo, e viene trasferito direttamente all'aria della stanza che lambisce il corpo delle persone. Il restante 30% è radiante e si riferisce al calore irradiato dalla superficie corporea degli occupanti e successivamente assorbito dalle superfici circostanti.

Per quanto riguarda la produzione di vapore la seguente tabella è usata come riferimento [39]:

Tabella 26 - Generazione di vapore per numero di persone e tipo di attività [39]

Numero di persone	Generazione di vapore [Kg/giorno]		
	Bassa produzione di attività	Media produzione di attività	Alta produzione di attività
1	3.5	6	9
2	4	8	11
3	4	9	12
4	5	10	14
5	6	11	15
6	7	12	16

APPARECCHIATURE ELETTRICHE

Per quanto riguarda le apparecchiature elettriche presenti dell'alloggio in oggetto, si è considerato esclusivamente quelli in zona giorno, trascurando le apparecchiature localizzate nelle zone notte e nei bagni, al fine di semplificare l'analisi. Tuttavia, è opportuno sottolineare che, a causa della mancanza di informazioni dettagliate riguardo ai dispositivi e agli elettrodomestici specifici presenti nell'alloggio, è stato necessario adottare un approccio di approssimazione. Con l'obiettivo di quantificare il contributo delle apparecchiature elettriche al carico termico interno dell'edificio, è stato implementato un calcolo basato su un carico medio. Questo carico medio è stato determinato mediante la somma delle potenze dei singoli dispositivi (tra cui TV, Router, PC, Forno a induzione, Frigorifero) moltiplicati per il rispettivo tempo di utilizzo [40]. Tale valore è stato successivamente suddiviso per il periodo di 24 ore, risultando in una potenza media di 315 W (1), ripartendola in componente convettiva e radiativa.

$$\text{Carico Medio} = \frac{90 * 7 + 5 * 24 + 1500 * 2 + 100 * 2 + 150 * 24}{24} = 315 \text{ W} \quad (1)$$

Tabella 27 - Potenze apparecchi elettrici

DISPOSITIVO	POTENZA [W]
TV	90
ROUTER	5
FORNO INDUZIONE	1500
PC	100
FRIGO	150

APPARECCHIATURE LUMINOSE

Va infine considerato anche l'apporto dell'illuminazione ai carichi interni. In questo caso, l'apporto luminoso è stato valutato in relazione alla superficie illuminata. Si è ipotizzato che nell'ambiente siano state installate lampadine fluorescenti con una potenza specifica di 11 W/m². La potenza effettiva è stata successivamente calcolata moltiplicando questa potenza per la superficie della zona specifica in cui le lampadine sono posizionate, come ad esempio la zona giorno o la zona notte.

Di seguito sono riportate le tabelle relative ai carichi e alle schedule corrispondenti.

Tabella 28 - Carichi interni di occupanti e luci

<i>Tipo di carico</i>	<i>Quantità</i>	<i>Sensibile +Latente</i>	<i>Sensibile Totale</i>	<i>Sensibile Convettivo</i>	<i>Sensibile radiativo</i>
	Persona	W/Persona	W/Persona	W/persona	W/Persona
Adulto	1	120	69.6	48.7	20.9
Bambino	1	90	52.2	36.5	15.7
Carico medio zona giorno	1	315	315	189	126
<i>Tipo di carico</i>	<i>Superficie</i>	<i>Potenza specifica</i>	<i>Sensibile Totale</i>	<i>Sensibile Convettivo</i>	<i>Sensibile radiativa</i>
	m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²
Lampade fluorescenti	Dipende dalla zona	11	11	7.15	3.85

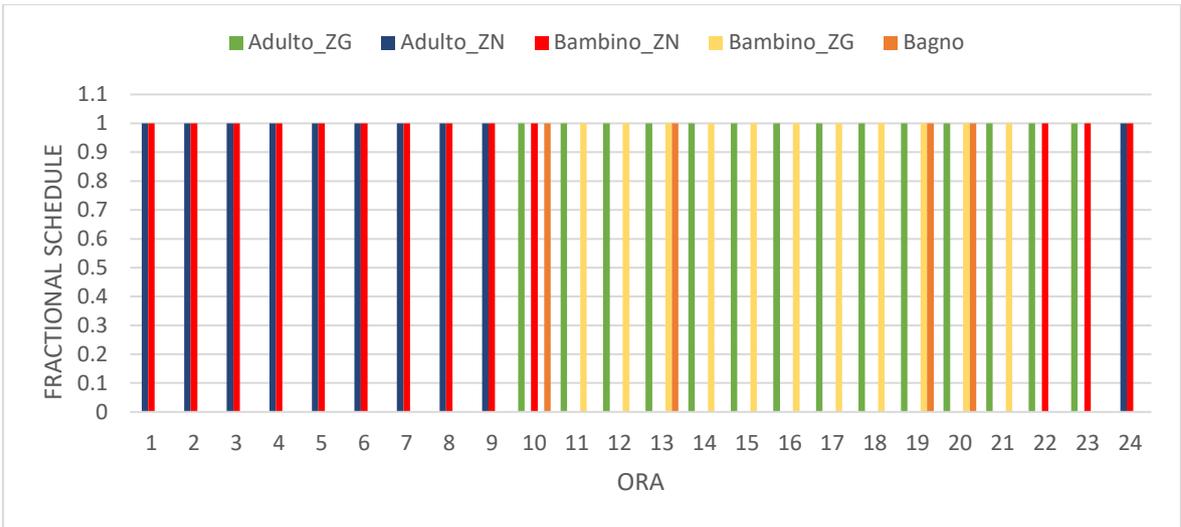


Figura 43 - Schedule relativa alle presenze durante una giornata feriale.

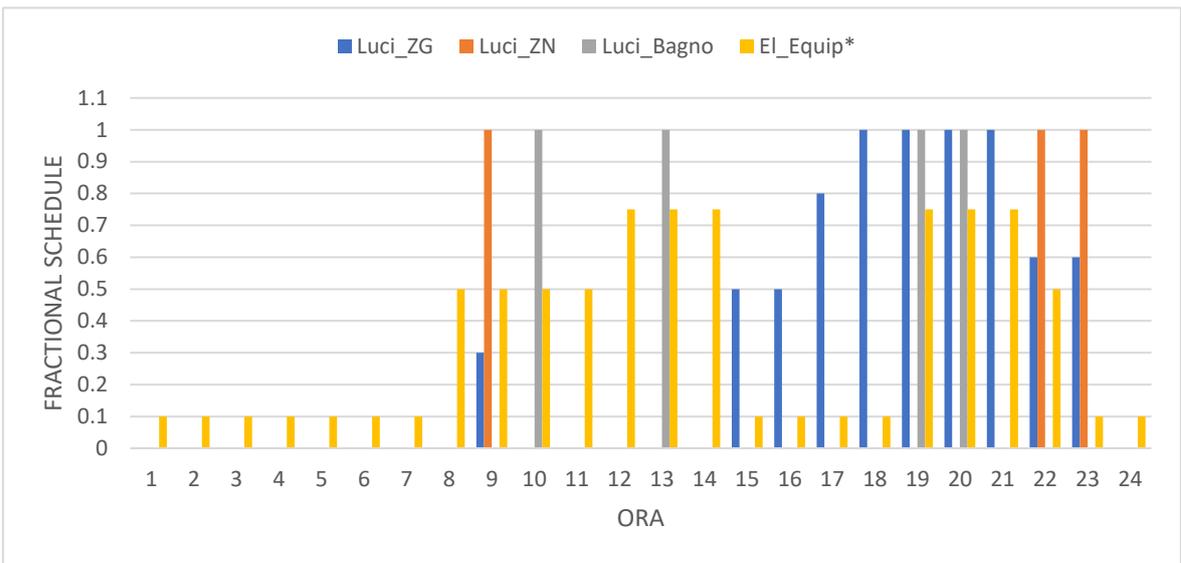


Figura 44 - Schedule relativa all'accensione di apparecchiature elettriche e luci nelle diverse zone termiche

3.8.2 *Simulation Studio*

Una volta completata la definizione dell'edificio e dei carichi interni all'interno dell'ambiente TRNBUILD, il focus si sposta all'interno di *Simulation Studio* dove si è realizzato l'implementazione dell'impianto HVAC, delle logiche di controllo e delle condizioni al contorno costituite dai dati climatici.

3.8.2.1 Dati metereologici

Un aspetto fondamentale per la calibrazione del modello è, quindi, la fedele riproduzione e simulazione dei parametri ambientali meteo. Questi dati meteo sono essenziali poiché influenzano in modo significativo il comportamento termico dell'edificio e del sistema di riscaldamento, fornendo così una base solida per l'analisi e l'ottimizzazione dell'efficienza energetica e del comfort nell'ambiente.

Il riferimento per i dati climatici è fornito dal database di *ARPAV* [36]. Non avendo a disposizione dati meteo specifici per Vigonza, è stato scelto di utilizzare i dati rilevati dalla vicina stazione meteorologica di Legnaro, i quali forniscono tutte le informazioni necessarie per il nostro modello.

Per l'importazione di tali dati, in TRNSYS si utilizza la Type9c. Gli output generati da questa componente sono stati successivamente utilizzati come input per la Type33, la quale richiede, a sua volta, la temperatura dell'aria secca, l'umidità relativa dell'aria e la pressione per il calcolo di diverse proprietà dell'aria umida, tra cui la temperatura dell'aria secca, la temperatura di rugiada, la temperatura del bulbo umido, il rapporto di umidità assoluta, l'umidità relativa e l'entalpia. Mentre gli output di quest'ultimo sono utilizzati come input per la Type69 che permette di determinare temperatura del cielo effettiva, fondamentale per il calcolo dello scambio per radiazione nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso tra le superfici esterne dell'edificio e la volta celeste. È importante sottolineare che la temperatura del cielo effettiva è sempre inferiore rispetto alla temperatura ambiente. Inoltre, gli output della Type9c sono stati impiegati anche come input per la Type16c, la quale, a partire dalla radiazione globale sul piano orizzontale, permette di calcolare la componente diffusa e quella diretta sulle diverse superfici dell'edificio, in base alla loro orientazione e inclinazione.

3.8.3 Serbatoi

Per simulare il comportamento dei serbatoi, sia per quanto riguarda il serbatoio dell'acqua calda sanitaria che il serbatoio inerziale, è stata effettuata una scelta specifica nell'utilizzo della Type534, come descritto nello studio condotto da Allard et al. [37]. Questo studio ha rivelato che la Type534 sembra fornire risultati di simulazione tra i più accurati e affidabili tra tutte le diverse tipologie di modelli disponibili.

3.8.3.1 Serbatoio ACS

La pompa di calore aria-acqua Panasonic Aquarea WH-UD07JE5-1 è un sistema All-in-One dotata di un serbatoio integrato di acqua calda sanitaria. Questo serbatoio di stoccaggio, da 185 litri, è stato modellato come un corpo cilindrico verticale a volume costante con uno scambiatore immerso, che permette di trasferire il calore da una sorgente esterna all'acqua all'interno del serbatoio. Il serbatoio è approssimato come un numero di nodi isotermi pari a 5, ottenendo una buona approssimazione del comportamento termico del serbatoio senza introdurre una eccessiva complessità computazionale.

Per quanto riguarda l'isolamento termico, i serbatoi adottano un innovativo sistema di isolamento termico basato su pannelli U-Vacua ($k = 0.002 \text{ W/(mK)}$), costituiti da due sottili lastre di alluminio accuratamente separate da un'intercapedine in cui è realizzato il vuoto. Si riportano in Fig. 45 e Fig.46 le specifiche del serbatoio per acqua calda sanitaria e dello scambiatore di calore immerso fornite dal costruttore.

Serbatoio ACS	Materiale		EN-1.4521
	Volume	l	185
	Pressione nominale	bar	10
Scambiatore serbatoio ACS	Materiale		EN-1.4162 / EN-1.4521
	Diametro	mm	22
	Spessore	mm	0.8
	Superficie	m ²	1.8
	Lunghezza totale	m	25

Figura 45 - Caratteristiche del serbatoio ACS e dello scambiatore di calore (fornite dal costruttore)

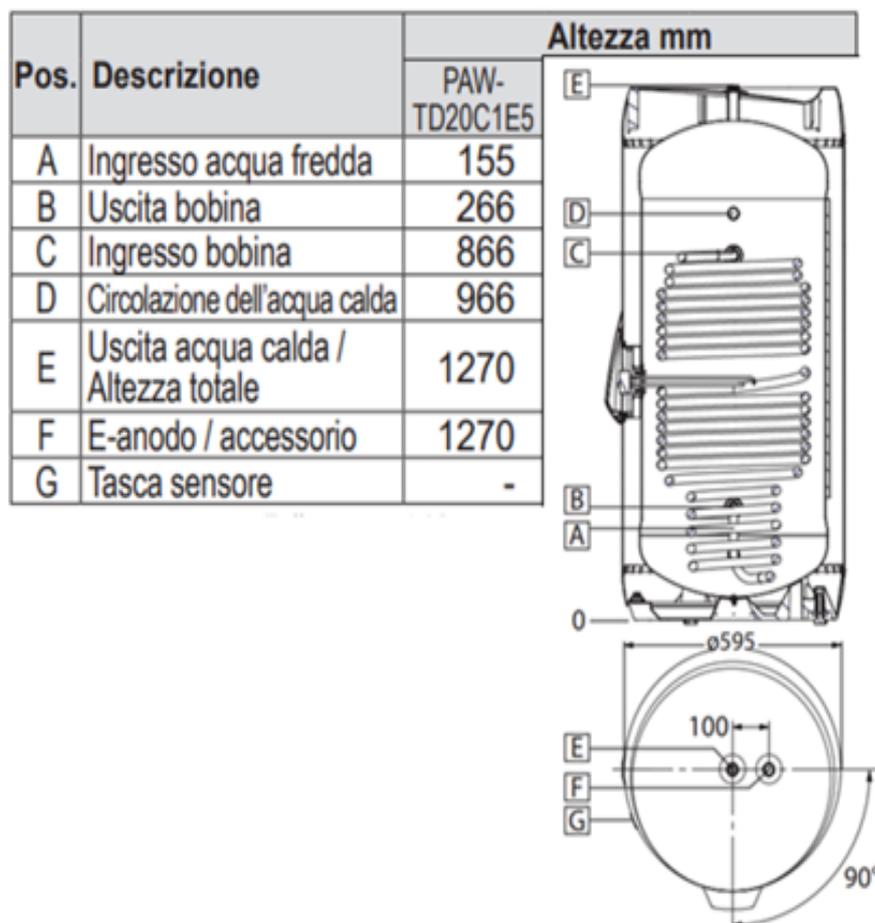


Figura 46 - Caratteristiche geometriche del serbatoio ACS

La richiesta di acqua calda sanitaria ha la priorità sul bisogno di riscaldamento degli ambienti. La temperatura nel serbatoio è mantenuta a 44°C ed è controllata da un termostato con una banda morta asimmetrica verso l'alto di 5°C. La logica di controllo che regola il serbatoio è fornita nel capitolo dedicato.

È presente anche una resistenza ausiliaria elettrica da 3 kW, posizionata nella parte superiore del serbatoio, la quale si accende con cadenza settimanale per evitare la proliferazione della Legionella, oltre ad entrare in azione quando la temperatura esterna scende sotto valori tra -15°C e -20°C.

Per la stima dei prelievi di ACS, si sono utilizzati i dati di monitoraggio di potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore e di temperatura interna. Infatti, quando i picchi di potenza elettrica si manifestavano e contemporaneamente non riscontravano variazioni notevoli di temperatura interna, si è dedotto che questi fossero principalmente correlati all'uso di acqua calda sanitaria. Quindi osservando i profili di temperatura interna e di potenza assorbita,

ottenuti dal monitoraggio, per il mese di marzo, si è individuato un profilo tipo di prelievo di acqua calda sanitaria.

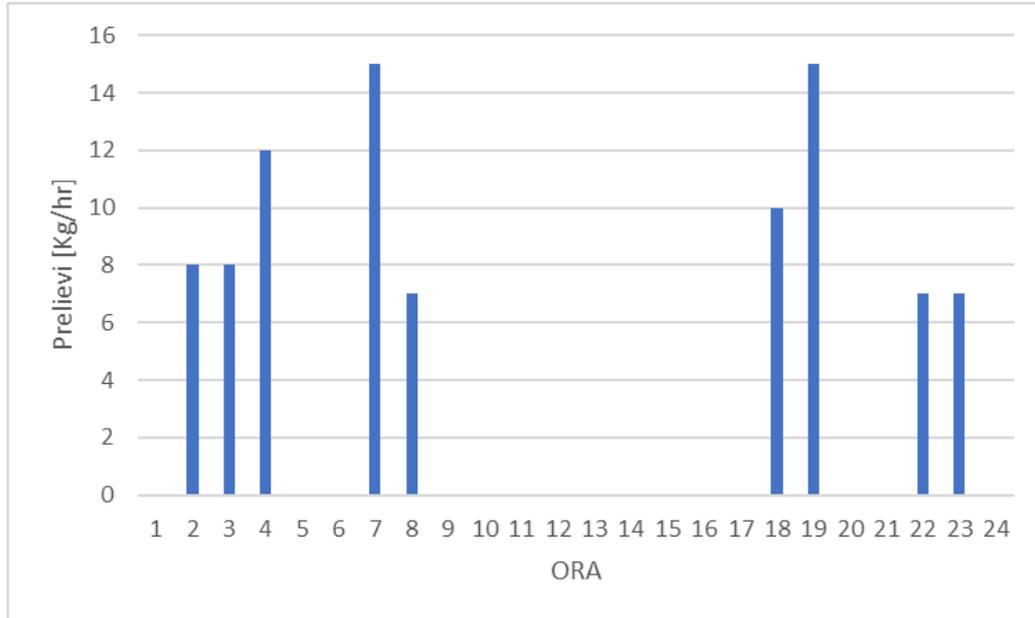


Figura 47 - Prelievo giornaliero tipo di acqua calda sanitaria

Invece, per il calcolo del prelievo medio giornaliero di acqua [l/giorno] si è utilizzata la normativa UNI/TS 11300-2 [38], che prescrive la formula (5) dipendente solamente dalla superficie utile dell'alloggio.

$$V_w = (a * A_{tot}) + b \quad (5)$$

Dove:

- A_{tot} = superficie utile totale dell'alloggio [m^2]
- a = parametro espresso in [$l/(m^2giorno)$], che dipende dalla superficie utile dell'appartamento;
- b = parametro espresso in [$l/(giorno)$], che dipende dalla superficie utile dell'appartamento.

Entrambi i parametri sono estrapolati dal prospetto 30 UNI/TS 11300-2:

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

Figura 47 - Prospetto 30 UNI/TS 11300-2. Definizione parametri a e b

Gli alloggi in questione, tutti caratterizzati da una superficie inferiore a 100 m², presentano valori dei coefficienti a e b rispettivamente pari a 1.067 [l / (m²giorno)] e 36.67 [l / (giorno)]. Si riportano di seguito i valori ottenuti:

Tabella 29 - Prelievo medio giornaliero per ogni appartamento secondo Normativa

Appartamenti	Superficie [m ²]	Volume [m ³]	a	b	V _w [l/giorno]
5A	65.17	175.95	1.067	36.67	106.20
6A	65.49	176.82	1.067	36.67	106.54
19D	99.46	268.54	1.067	36.67	142.79
20E	73.05	197.23	1.067	36.67	114.61
21E	73.05	197.23	1.067	36.67	114.61
22C	99.91	269.75	1.067	36.67	143.27

Si è calcolato, secondo normativa di riferimento, un consumo giornaliero di circa 107 litri. Tuttavia, tale valore potrebbe essere sovrastimato, considerando che nell'abitazione risiedono solo un adulto e un bambino. Di conseguenza, si è ipotizzato una riduzione di circa 25% di questo valore al fine di tener conto delle dimensioni del nucleo familiare.

Per simulare la variazione di temperatura, durante il periodo di simulazione, dell'acqua fredda proveniente dall'acquedotto si è utilizzato la Type501. Questa subroutine consente di modellare la distribuzione verticale della temperatura all'interno del terreno, ed la temperatura dell'acqua seguirà le stesse fluttuazioni.

3.8.3.2 Serbatoio inerziale

All'interno del modello è stato inserito anche un serbatoio inerziale, che non è parte dell'impianto reale, per tenere conto dell'inerzia termica dell'impianto radiante. Per la modellazione, anche in questo caso si è utilizzato la Type534, in questo caso senza scambiatore di calore immerso, e il volume del serbatoio è pari al volume totale dell'acqua dell'impianto, basato sulle dimensioni dei tubi nel sistema di pavimento radiante.

Tabella 30 - Calcolo del volume fittizio del serbatoio inerziale per i diversi appartamenti del Blocco C

Appartamenti	Ltot_tubi [m]	Dint_tubi [m]	Vfittizio inerziale [l]	Larghezza serbatoio [m]	Altezza serbatoio [m]
5A	434.47	0.018	110.55	0.492	0.581
6A	436.6	0.018	111.10	0.492	0.584
19D	663.07	0.018	168.73	0.492	0.887
20E	487	0.018	123.92	0.492	0.651
21E	487	0.018	123.92	0.492	0.651
22C	666.07	0.018	169.49	0.492	0.891

3.8.4 Modellazione della pompa di calore

In TRNSYS sono presenti differenti Types capaci di simulare il funzionamento delle pompe di calore. Alcuni di essi, come la Type941, funzionano solamente in modalità ON-OFF, quindi non rappresentativa del reale funzionamento della nostra pompa di calore a velocità variabile. Infatti, una pompa di calore a velocità variabile è in grado di regolare la frequenza del compressore e, di conseguenza, di variare la capacità erogata in modo continuo, in risposta alle condizioni ambientali e alle esigenze dell'edificio, offrendo un controllo più preciso e un maggiore potenziale di risparmio energetico. Ovviamente sono presenti nelle librerie TESS anche Types capaci di simulare le prestazioni in condizioni di *off-design*. Tuttavia, questi modelli, molto spesso richiedono mappe prestazionali molto dettagliate e spesso i dati tecnici presenti nei cataloghi dei costruttori si limitano al funzionamento a carico nominale e per determinate temperature esterne e di uscita dell'acqua calda. Quindi si è deciso di realizzare una macro Excel in grado di simulare il funzionamento della pompa di calore aria-acqua installata nell'unità 6A del blocco C anche in condizioni di fuori progetto. Tuttavia, è importante notare che la macro Excel presenta alcune limitazioni. In particolare, al momento della simulazione, non tiene conto del funzionamento in fase di *defrosting*, né di come il COP venga penalizzato in queste condizioni. Questo aspetto potrebbe portare a una leggera imprecisione nelle previsioni delle prestazioni, specialmente durante i mesi caratterizzati da temperature molto basse.

Le pompe di calore a capacità fissa, in assenza di regolazione continua della potenza, operano in modalità on/off.. Le pompe di calore con capacità variabile, utilizzando compressori a inverter, cercano di mitigare questo problema regolando continuamente la potenza in modo da adattarsi in maniera più efficiente alle esigenze, riducendo così il ciclo

di accensione e spegnimento. Ciò contribuisce a migliorare le prestazioni energetiche complessive delle macchine. Tuttavia, anche se si utilizza un inverter di frequenza per adattare la potenza del compressore alle esigenze di riscaldamento o raffreddamento, questa regolazione non è in grado di eliminare completamente la necessità di accensione e spegnimento dell'unità. Infatti, quando la richiesta di carico è molto bassa (30%-40%), la pompa di calore dovrà ancora passare attraverso cicli di accensione e spegnimento, anche se meno frequenti rispetto a un sistema a capacità fissa. Questo comporta una diminuzione dell'efficienza complessiva dell'unità in condizioni di carico parziale, poiché il COP è influenzato negativamente da questi cicli di accensione e spegnimento. Quindi risulta necessario caratterizzare la pompa di calore a carico parziale al fine di procedere con la simulazione.

3.8.4.1 Funzionamento a carico parziale

Al fine di realizzare la macro Excel è necessario creare una mappa prestazionale della macchina a carico parziale a partire dai valori a carico nominale forniti dal costruttore

Tabella 32 - Tabelle prestazionali della pompa di calore a carico nominale (100%) fornite dal costruttore

Panasonic Aquarea WH-UD07JE5							
Capacità termica [kW]		Temperatura aria esterna [C]					
		-20	-15	-7	2	7	25
Temperatura mandata [C]	25	4.33	5.16	5.64	6.8	7.55	7
	35	3.98	4.75	6.02	6.85	7	6.88
	45	3.83	4.65	5.5	6.75	7	7
	55	3.3	4.5	5.25	6.2	7	6.92
	60	-	-	4.98	6.18	6.86	6.83

Panasonic Aquarea WH-UD07JE5							
Assorbimento [kW]		Temperatura aria esterna [C]					
		-20	-15	-7	2	7	25
Temperatura mandata [C]	25	1.64	1.69	1.56	1.57	1.15	0.62
	35	1.88	2	1.96	2.01	1.47	0.9
	45	2.26	2.4	2.3	2.4	1.96	1.33
	55	2.77	2.96	2.7	2.8	2.48	1.75
	60	-	-	2.9	2.91	2.75	1.9

Panasonic Aquarea WH-UD07JE5							
COP		Temperatura aria esterna [C]					
		-20	-15	-7	2	7	25
Temperatura mandata[C]	25	2.64	3.05	3.61	4.33	6.56	11.29
	35	2.11	2.37	3.07	3.40	4.76	7.64
	45	1.69	1.93	2.39	2.81	3.57	5.26
	55	1.19	1.52	1.94	2.21	2.82	3.95
	60	-	-	1.71	2.12	2.49	3.59

Il metodo per calcolare la riduzione del COP per una pompa di calore aria-acqua a carico parziale, viene fornita dalla normativa europea EN 14825 [40].

Essa definisce il COP_{PL} tenendo conto di due fattori:

- **PLR (Rapporto di Carico Parziale):** definito come il rapporto tra il carico effettivo fornito, cioè la richiesta termica dell'edificio, e il carico che potrebbe essere fornito se la macchina operasse in condizioni nominali.
- **Fattore di degradazione C_c :** è un fattore che tiene conto del consumo energetico in stand-by e della riduzione dell'efficienza energetica della pompa di calore a causa dei cicli ON-OFF.

Tale valore dovrebbe essere determinato individualmente per ogni pompa di calore con prove sperimentali. Tuttavia, spesso i fornitori non forniscono questo coefficiente e quindi, di conseguenza, la normativa propone un valore pari a $C_c = 0.9$.

Quindi il COP a carico parziale può essere calcolato nel seguente modo:

$$COP_{PL} = COP_{NOM} * \frac{PLR}{C_c * PLR + (1 - C_c)} \quad (6)$$

Tuttavia, studi hanno dimostrato una certa discrepanza tra i valori ottenuti secondo normativa e quelli misurati, dovuto al fatto che non si tiene conto delle perdite all'avvio della pompa di calore [39]. Gli autori hanno proposto una formulazione modificata (7) per tenere conto di questo fenomeno aggiungendo un altro coefficiente di degradazione C_D che può essere assunto pari a 0.25:

$$PLF = \frac{1}{1 + \frac{C_D * (1 - PLR)}{1 - C_D * (1 - PLR)} + (1 - C_c) \frac{(1 - PLR)}{PLR}} \quad (7)$$

Dove:

- PLF è il fattore di carico parziale, definito come il rapporto tra il COP a carico parziale e il COP in condizioni nominali equivalente;
- PLR è il rapporto di carico parziale, definito come il rapporto tra la richiesta termica dell'edificio e la capacità termica della pompa di calore a carico nominale;

- Cd è il coefficiente di degrado dovuto alle perdite all'avvio;
- Cc è il coefficiente di degrado dovuto alle perdite in stand-by.

3.8.5 Modellazione del pavimento radiante

Il sistema di pavimento radiante, che è presente in tutte le zone termiche dell'alloggio, è stato rappresentato nel modello in TRNSYS utilizzando gli *active layers*. Questa terminologia deriva dal fatto che queste strutture edilizie contengono i tubi attraverso i quali scorre il fluido termovettore per regolare la temperatura ambientale, contribuendo al riscaldamento o al raffrescamento dello stesso. La definizione di un *active layer* richiede la specifica di cinque parametri chiave: il calore specifico del fluido, passo tra i tubi, il diametro dei tubi, lo spessore dello strato e la conducibilità termica del tubo. Questi parametri sono stati recuperati dalla Legge 10, ad eccezione del passo tra i tubi. Questa informazione non era disponibile nelle documentazioni tecniche fornite, quindi è stata assunto un passo di 15 cm come valore di riferimento per il modello.

Tabella 33- Definizione dell'active layer

Passo tra i tubi	0.15 m
Diametro esterno	20 mm
Spessore dei tubi	2 mm
Conducibilità termica dei tubi	0.44 W/mk

Per quanto riguarda la stratigrafia, le informazioni dettagliate riguardanti la composizione dei materiali e le caratteristiche delle stratigrafie sono state presentate e descritte nel capitolo dedicato. A scopo illustrativo, si mostra la stratigrafia di un pavimento radiante definito all'interno dell'ambiente TRNBUILD.

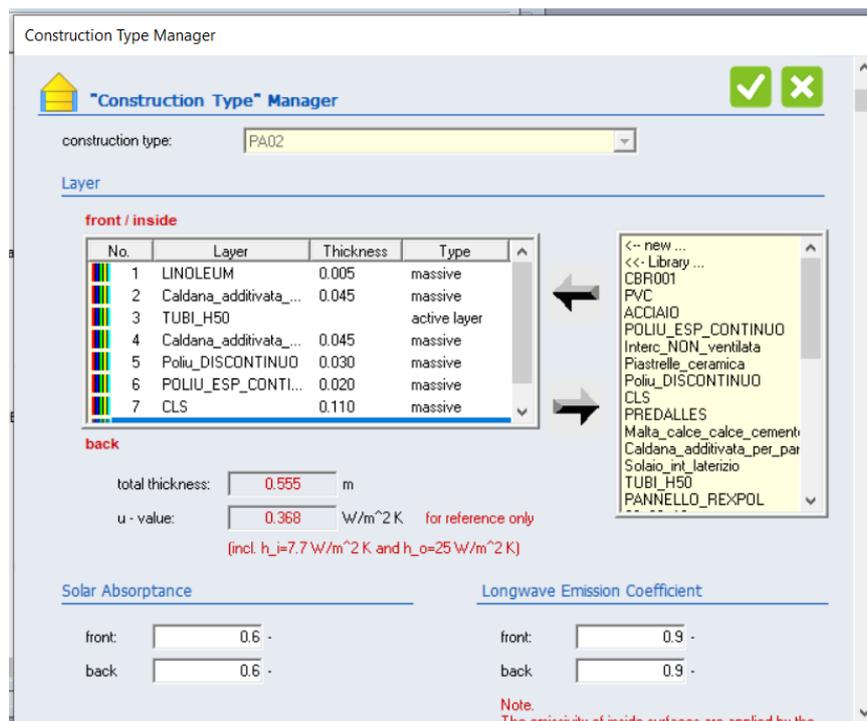


Figura 48 - Finestra di dialogo che permette di realizzare la stratigrafia in TRNBUILD (esempio per il pavimento radiante del soggiorno)

Una volta definito l'*active layer* in tutte le zone termiche, è stato necessario definire la temperatura di ingresso dell'acqua e la portata. È importante notare che la portata e la temperatura dell'acqua sono state determinate esternamente al software TRNBUILD. In particolare, questi parametri sono stati calcolati utilizzando il sistema realizzato su *Simulation Studio* e vengono forniti come input alla Type56, che gestisce il pavimento radiante all'interno del modello. La temperatura di ingresso dell'acqua è la stessa per tutte le zone termiche dell'edificio mentre la portata dell'acqua di mandata è diversa per ogni zona termica dell'edificio. Per il calcolo delle portate per ogni zona termica, si è considerato la portata totale riportata in Legge10, ripartita per ogni zona termica, in modo proporzionale alla superficie di ciascuna zona termica

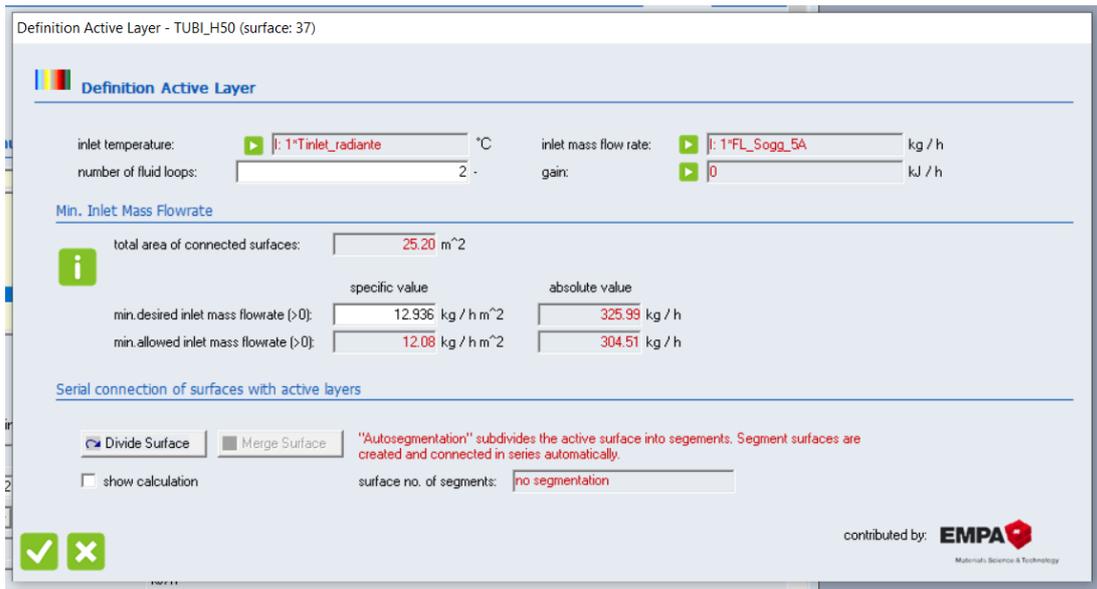


Figura 49 - Finestra di dialogo che permette di inserire la portata, la temperatura e il numero di circuiti del pavimento radiante per ogni zona termica (esempio del soggiorno)

3.8.5.1 Logiche di controllo

3.8.5.1.1 Serbatoi

Per il controllo dei serbatoi, sia quello inerziale che di acqua calda sanitaria, si è utilizzato la Type2 “*Differential Controller*” che permette di controllare l’accensione della pompa di calore per riscaldare il serbatoio ACS e dell’inerziale, affinché la temperatura rimanga entro i limiti desiderati. Questo controller genera una funzione di controllo λ_o che può assumere un valore tra 0 e 1 e tale valore viene calcolato in base alla differenza di temperatura superiore e inferiore, quindi T_H e T_L , rispetto alle due bande morte di differenza di temperatura rispetto il set-point ΔT_H e ΔT_L per prevenire cicli frequenti di accensione e spegnimento del sistema dovuto a fluttuazioni minori di temperatura e quindi garantire una regolazione più stabile della temperatura. Il suo output all’istante precedente λ_i viene collegato nuovamente in ingresso, al segnale di controllo in ingresso λ_i , creando un effetto isteresi, garantendo un funzionamento più stabile.

- T_H [°C] input di temperatura superiore da cui verrà sottratta la temperatura inferiore T_L ;
- T_L [°C] input di temperatura inferiore;
- T_{in} [°C] la temperatura da monitorare per il controllo;
- λ_i [0;1] funzione di controllo in input all’istante precedente;

- $\lambda_o [0;1]$ funzione di controllo di output;
- $\Delta T_H [^{\circ}C]$ banda superiore di differenza di temperatura che determina quando il controller dovrebbe accendere o spegnere il sistema;
- $\Delta T_L [^{\circ}C]$ banda inferiore di differenza di temperatura che determina quando il controller dovrebbe accendere o spegnere il sistema.

Le equazioni che governano questo controller sono le seguenti:

1. Se la funzione di controllo era precedentemente ON ($\lambda_i=1$):

$$\begin{aligned} \text{Se } \Delta T_L \leq (T_H - T_L) \text{ allora } \lambda_o &= 1 \\ \text{Se } \Delta T_L > (T_H - T_L) \text{ allora } \lambda_o &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

2. Se la funzione di controllo era precedentemente OFF ($\lambda_i=0$):

$$\begin{aligned} \text{Se } \Delta T_H \leq (T_H - T_L) \text{ allora } \lambda_o &= 1 \\ \text{Se } \Delta T_H > (T_H - T_L) \text{ allora } \lambda_o &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

La logica di controllo viene illustrata graficamente (Fig. 50):

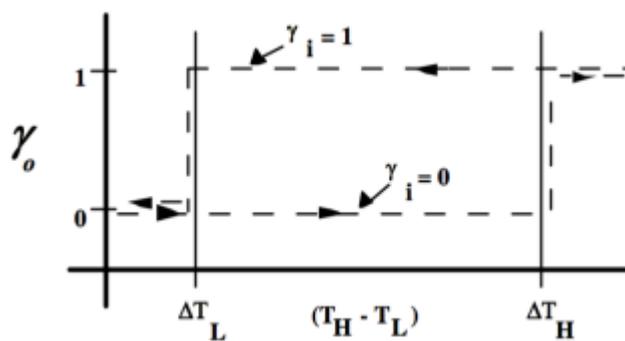


Figura 50 - logica di controllo

Nel caso del serbatoio dell'ACS, la temperatura superiore (Nodo 1) del serbatoio è la temperatura da monitorare, mentre la temperatura del secondo nodo (Nodo 2) è collegata all'input T_L . La banda morte superiore ΔT_H e inferiore ΔT_L sono rispettivamente pari a $5^{\circ}C$

e 0°C, mentre la temperatura da superiore T_L è stata imposta pari a 44°C. Questo significa che il controller spegnerà la pompa di calore quando la temperatura del Nodo 1 del serbatoio è al massimo 5°C più alta della temperatura del Nodo 2, mentre manterrà la pompa di calore accesa finché la differenza di temperatura tra il Nodo1 e il Nodo2 è inferiore a 5°C.

La stessa logica di controllo è stata estesa al serbatoio inerziale. In questo caso, il T_H è la temperatura in uscita verso il sistema radiante, La temperatura da monitorare T_{in} corrisponde alla temperatura del nodo 2 del serbatoio inerziale, mentre la temperatura di setpoint del serbatoio è stabilita a 35°C.

3.8.5.1.2 Sistema radiante

L'accensione del sistema radiante è controllata utilizzando un semplice termostato. Questo termostato opera con una "banda morta" di 0.5°C, il che implica che il riscaldamento si attiva quando la temperatura scenderà di almeno 0.25°C sotto il set-point e si spegneranno quando la temperatura raggiungerà o supererà il set-point di almeno 0.25°C. Il valore del set-point del termostato è determinato da un'equazione che si aggiorna automaticamente in funzione dell'ora del giorno e della temperatura dell'aria esterna in quell'istante di tempo.

L'equazione è strutturata per vari intervalli di tempo durante il giorno:

- Dalle 00:00 alle 11:00, il set-point è di 18.7°C.
- Dalle 11:00 alle 15:00, il set-point è di 19.5°C.
- Dalle 15:00 alle 19:00, il set-point è di 18.7°C.
- Dalle 19:00 alle 21:30, il set-point è di 19.5°C.
- Dalle 21:30 alle 24:00, il set-point è di 18.7°C.

Inoltre, il set-point è condizionato dalla temperatura dell'ambiente esterno. Se questa è superiore a 18°C, il sistema di riscaldamento non entra in funzione.

3.9 Introduzione a CONTAM

La valutazione del comportamento energetico e della qualità dell'aria interna richiede un approccio complesso ed integrato, visto che i flussi termici, i flussi d'aria e la concentrazione di inquinanti sono fenomeni fisici interdipendenti che richiedono di essere studiati congiuntamente.

Esistono due possibili metodi per quanto riguarda l'integrazione del modello termico e del modello di ventilazione [41]:

- 1) Il metodo “*Ping-Pong*”, in cui i due modelli si alternano tra loro in passi temporali successivi e, quindi, ciascun modello utilizza i risultati forniti dall’altro modello al time-step precedente.
- 2) Il metodo “*Onion*”, in cui il modello termico e di ventilazione si scambiano dati iterativamente all’interno del medesimo step temporale fino a raggiungere entrambi la convergenza. Ciò implica che i modelli raffinano continuamente i loro calcoli all’interno dello stesso passo temporale fino a convergere a una soluzione in base ad una tolleranza fissata.

CONTAM è un software di simulazione sviluppato dal *National Institute of Standards and Technology* (NIST) degli Stati Uniti [42], caratterizzato da un’interfaccia user-friendly, progettato per condurre analisi dettagliate della qualità dell’aria interna e della ventilazione all’interno degli edifici, concentrandosi su tre aspetti:

- **Analisi dei flussi d’aria:** CONTAM calcola le portate d’aria all’interno di un edificio, compresi quelli dovuti a infiltrazioni dall’esterno, esfiltrazioni dall’interno e i flussi che transitano tra stanze adiacenti all’interno dell’edificio, considerando sia i sistemi di ventilazione meccanica che naturale. Questa analisi considera l’influenza di vari fattori, tra cui l’effetto vento e la differenza di temperatura tra l’aria interna e quella esterna.
- **Analisi delle concentrazioni di contaminanti:** il software è in grado di modellare la generazione di contaminanti da diverse fonti ed è in grado di prevedere come essi si diffondono all’interno dell’ambiente. Questo include la previsione delle concentrazioni di contaminanti nelle varie stanze e la loro variazione nel tempo.
- **Valutazione dell’esposizione:** CONTAM è in grado di fornire una stima dell’esposizione degli occupanti agli inquinanti presenti nell’ambiente, grazie alla capacità di monitorare e predire la dispersione dei contaminanti all’interno dell’edificio nel tempo, tenendo conto delle specifiche attività e dei comportamenti degli occupanti.

Al fine di analizzare, quindi, i complessi meccanismi di interazione tra le sollecitazioni provenienti dall’esterno e le dinamiche interne all’edificio, esso richiede in input i parametri relativi all’ambiente esterno.

CONTAM non è in grado di calcolare i flussi termici, può solo determinare i flussi d’aria generati dalle differenze di temperatura. Quindi esso richiede all’utente di impostare le

temperature di ogni zona termica; questo è un limite del software, soprattutto quando gli edifici analizzati sono edifici sprovvisti di sistemi di riscaldamento e di raffrescamento, poiché le temperature interne sono principalmente influenzate dalle condizioni esterne e carichi termici interni.

3.9.1 Accoppiamento dinamico CONTAM – TRNSYS

Questa limitazione può essere superata accoppiando CONTAM con un software di modellazione multi-zona capace di trattare i processi di scambio termico, in modo tale da considerare sia il trasporto termico che i flussi d'aria in modo più completo. L'integrazione con TRNSYS è resa possibile mediante l'utilizzo della Type97; tuttavia, essa non permette di usufruire completamente di tutte le funzionalità di CONTAM, specialmente quelle più avanzate come la modellazione del trasporto di inquinanti, oltre a non sfruttare appieno la libreria del software relativa alla modellazione delle portate d'aria che transitano attraverso vari tipi di aperture, bocchette, condotte, etc.

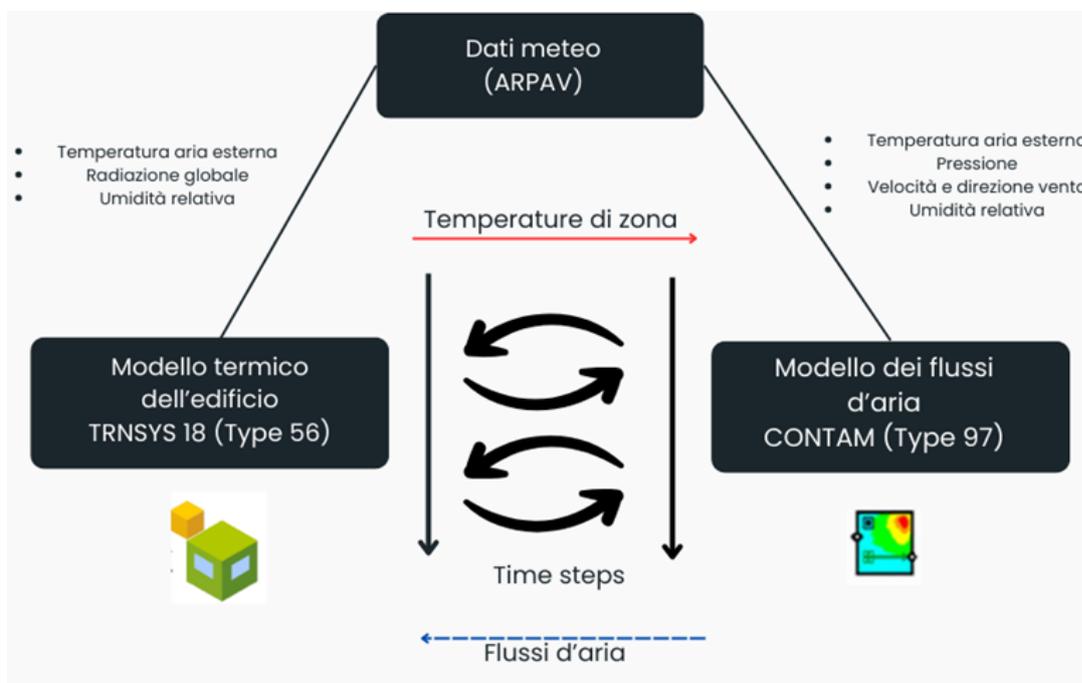


Figura 51 - Accoppiamento dinamico Trnsys – Contam

3.9.2 Modellazione geometrica

Gli edifici sotto analisi sono suddivisi in cinque blocchi edilizi, ciascuno composto da 6 unità immobiliari articolate su tre livelli, per un totale di trenta abitazioni. Ai piani terra di ogni edificio sono allocate due unità, alle quali è destinato un impianto di ventilazione meccanico, di cui uno a doppio flusso con recuperatore e l'altro a singolo flusso, mentre le restanti 4 abitazioni per edificio, dislocate ai piani primo e secondo, sono dotate di un sistema di ventilazione naturale mediante camino solare o lucernari.

Considerando esclusivamente il primo e secondo piano di un singolo blocco edilizio, negli appartamenti centrali è prevista l'integrazione del camino solare realizzato nel servizio igienico al secondo piano, mentre nelle unità laterali è contemplata unicamente la presenza di un lucernario nello stesso locale. Ciononostante, per queste ultime sussiste la possibilità di accesso al tetto attraverso un vano scale, la quale contribuisce, seppur in modo ridotto, al tiraggio naturale.

La rappresentazione dell'edificio viene eseguita attraverso una semplificazione in un insieme di zone che rappresentino stanze o spazi specifici all'interno dell'edificio stesso e ogni zona è trattata come un singolo nodo, assumendo che la zona sia completamente miscelata (temperatura, densità e concentrazione di contaminanti sono considerati come valori medi su tutto lo spazio della zona stessa). Una volta definite le zone, è importante stabilire come esse sono connesse tra loro e con l'ambiente esterno attraverso l'inserimento di fessure, aperture, bocchette e altri punti di comunicazione attraverso i quali l'aria può muoversi da una zona all'altra, o dall'ambiente esterno verso l'interno e viceversa.

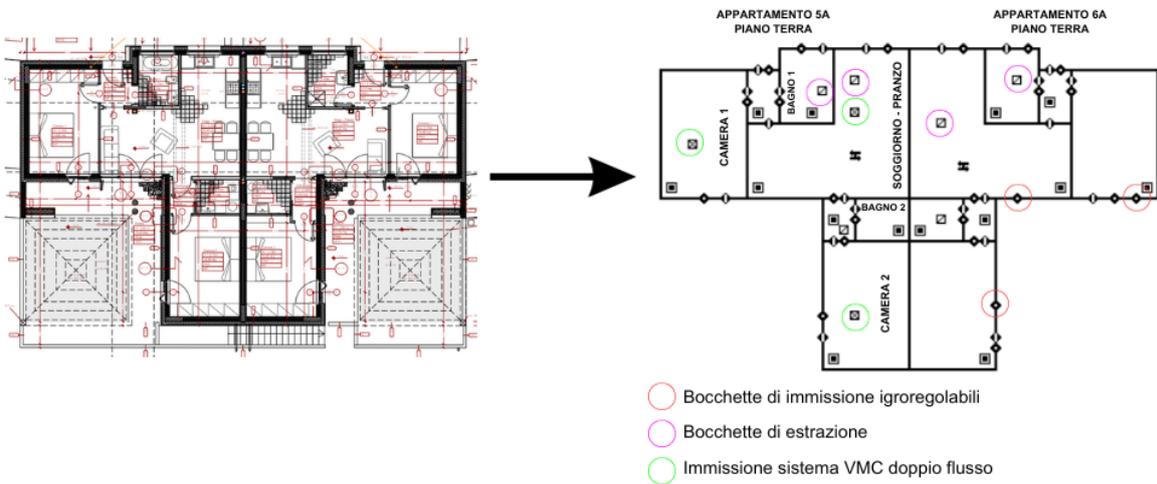


Figura 52 - Modellazione geometrica degli appartamenti 5A E 6A, piano terra, Blocco C

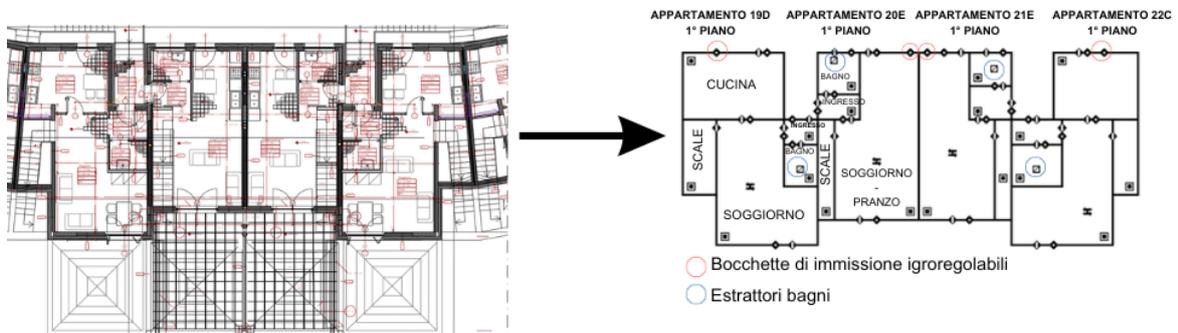


Figura 53 - Modellazione geometrica degli appartamenti 19D, 20E, 21E, 22C, primo piano, Blocco C.

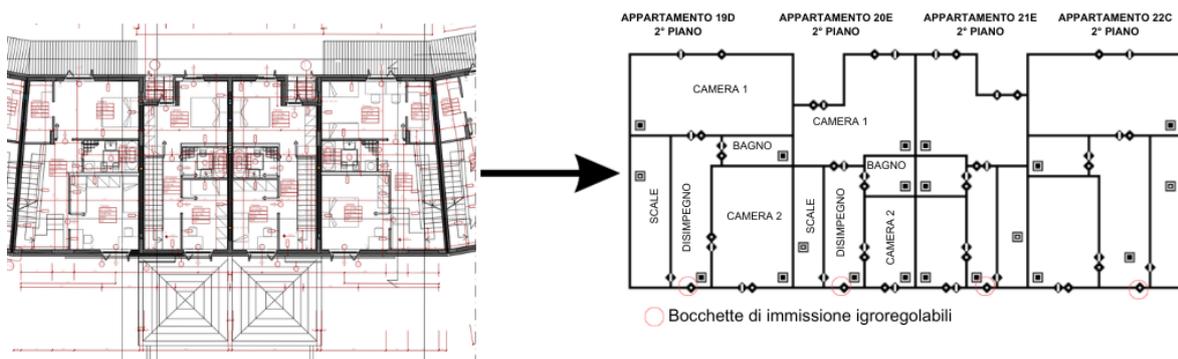


Figura 54 - Modellazione geometrica degli appartamenti 19D, 20E, 21E, 22C, secondo piano, Blocco C.

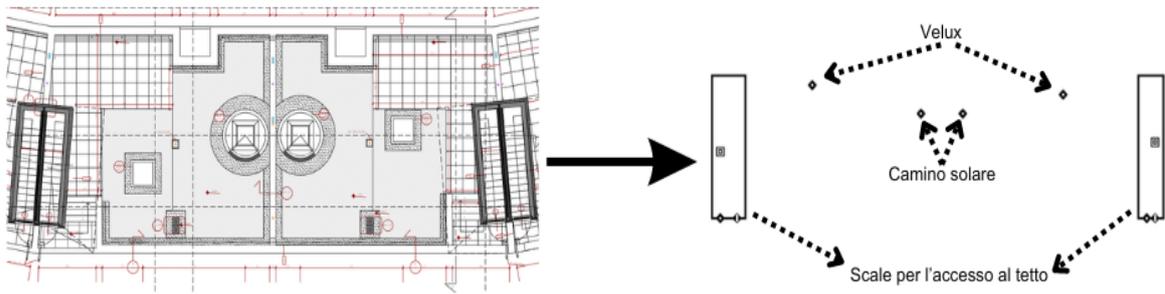


Figura 55 - Modellazione geometrica del tetto, Blocco C.

Nel presente lavoro è stata affrontata in maniera approfondita l'analisi dell'appartamento tipo al piano terra 6A, caratterizzato da un sistema di ventilazione meccanica a singolo flusso. Tuttavia, al fine di ottenere un quadro il più completo possibile del funzionamento degli impianti di aerazione installati nell'intero complesso residenziale oggetto di studio, sono state simulate anche le altre tipologie abitative presenti.

In particolare, sono stati sviluppati modelli anche per:

- Le unità al piano terra con ventilazione meccanica a doppio flusso, al fine di valutarne la prestazione.
- Gli alloggi ai piani superiori, dotati di sistemi di ventilazione naturale a camino solare o lucernario, per esaminarne le caratteristiche.

Questa scelta si è resa necessaria per acquisire una visione il più possibile completa della tematica affrontata, considerando tutte le soluzioni progettuali adottate.

Nella modellazione degli alloggi, sono state introdotte alcune ipotesi semplificative al fine di rendere gestibile la complessità della simulazione, pur risultando adeguatamente rappresentativo il modello elaborato.

In particolare:

- Tutti i piani presentano un'altezza standard di 2,7 m.
- Camino solare e lucernario sono stati definiti come "orifici", senza considerare le reali dimensioni tridimensionali degli elementi. Ciò è dovuto ai limiti della Type97 che non consente di esportare correttamente il modello su TRNSYS tenendo conto dell'altezza dei singoli elementi. Pertanto, per camino e lucernario è stata inserita solo l'area dell'apertura di imbocco dal bagno, trascurandone la reale geometria. Questa semplificazione, imposta dalle problematiche di interfaccia tra i software adottati, non ha permesso di sfruttare appieno le

potenzialità di CONTAM nella simulazione tridimensionale delle correnti generate dagli elementi di ventilazione naturale.

- Il vano scale si sviluppa idealmente su due livelli per un'altezza complessiva di 5,4 m, senza considerare quindi la presenza delle scale.
- I flussi d'aria sono scambiati con l'esterno attraverso bocchette, camino solare, lucernario e difetti di tenuta degli infissi (finestre, portefinestre e porte esterne). Quindi non sono state trascurate le infiltrazioni attraverso le porte e finestre chiuse e questo ha permesso di rendere il modello più aderente alla reale interazione tra l'ambiente interno, l'involucro edilizio e l'esterno, non trascurando che queste portate, seppur limitate, contribuiscono a determinare i flussi d'aria complessivi negli ambienti.
- Le porte interne sono state considerate chiuse, e quindi sono state considerate le infiltrazioni d'aria attraverso le aperture attorno alle porte.
- Le finestre e portefinestre sono state assunte chiuse durante il periodo invernale in quanto il ricambio d'aria dovrebbe essere assicurato dai sistemi di ventilazione meccanica e dalle bocchette.
- I flussi sono calcolati in funzione della differenza di pressione ai lati delle aperture.
- Le porte interne sono considerate aperte e sono modellate come elementi di connessione bidirezionale tra locali.
- Le bocchette esterne sono state modellate come orifici.

Tali assunzioni hanno reso più dettagliata la modellazione.

3.9.3 Modellazione dei flussi

- INFILTRAZIONI

La maggior parte dei modelli di infiltrazione viene descritta attraverso una legge di potenza (*power law*) tra la portata volumetrica d'aria e la differenza di pressione attraverso una fessura o un'apertura nell'involucro dell'edificio:

$$Q = KA (\Delta P)^n \quad (10)$$

Dove:

- Q = portata volumetrica d'aria [m^3/s];
- K = è un fattore di flusso che tiene conto del coefficiente di scarico (discharge coefficient) C_D ;
- A = area dell'apertura [m^2];
- ΔP = differenza di pressione [Pa];
- n = esponente che può variare tra 0.5 e 1.

Quando si considerano i flussi attraverso le fessure attorno i montanti delle porte chiuse, è comune assumere $n = 0.5$ e $C_d = 0.6-0.7$ [42].

Il valore del coefficiente “n” non andrebbe considerato automaticamente pari a 0.5 ma, dipende dalle condizioni di moto attraverso l'apertura o fessura in esame. A numeri di Reynolds elevati, cioè quando si instaura un regime turbolento e le forze di inerzia dominano sulle forze di viscosità, l'esponente “n” si avvicina a 0.5. Mentre in regime laminare, cioè a Reynolds bassi, l'esponente “n” si avvicina a 1.

Tabella 31 - Valori di n utilizzati nel modello CONTAM per finestre, porta e bocchette.

Tipologia	Esponente n
Fessure delle finestre	0.62
Spiragli porte	0.5
Bocchette di mandata e ripresa dell'aria	0.5

Per quando riguarda i coefficienti di scarico C_D sono influenzati sia dalla geometria dell'apertura che dal numero di Reynolds come si può vedere nella figura [56].

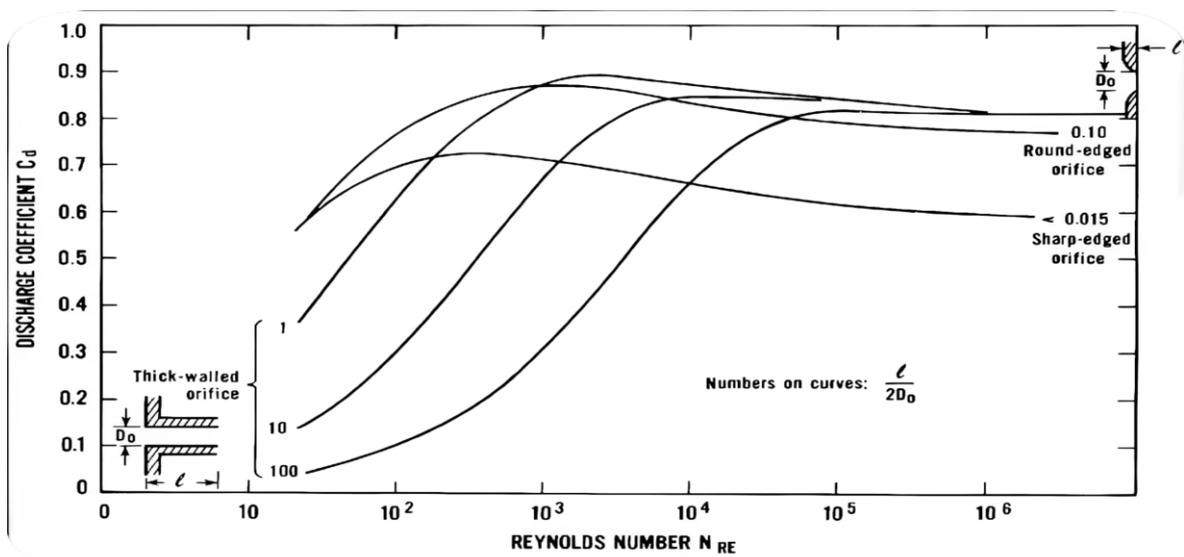


Figura 56 - Valori del coefficiente di scarico in funzione della geometria e numero di Reynolds [43]

Per la modellazione di aperture di grandi dimensioni, quali porte o finestre aperte, attraverso le quali le differenze di pressione tra i lati delle stesse possono generare flussi bidirezionali, è stato impiegato il modello a due aperture (*Two-opening Model*). In questo modello, l'apertura viene divisa in due parti verticalmente e il flusso viene analizzato utilizzando due modelli di legge di potenza (*Powerlaw models*), uno per ciascuna delle due sezioni. Tuttavia, sono state considerate chiuse per tutto il periodo invernale, specialmente nel caso degli appartamenti al piano terra in cui il ricambio d'aria dovrebbe essere assicurato dai sistemi di ventilazione meccanica, e si sono considerate solamente le infiltrazioni attraverso i difetti di tenuta. Per questi ultimi, è stato considerato un gap di 2 mm per le porte e 1 mm per le finestre, lungo tutto il perimetro dell'infisso. Il valore di n è stato assunto dalla Tab. 24, mentre il coefficiente di scarico pari a 0.5 per le porte e 0.62 per le finestre.

Per il sistema di ventilazione meccanica, è stata considerata una portata di $30 \text{ m}^3/\text{h}$, in conformità con la Legge 10 mentre, per quanto riguarda le bocchette igroregolabili e di ventilazione, non essendo state fornite informazioni dettagliate sulle specifiche tecniche, esse sono state modellate come orifizi (*Orifice Area Data*) con una sezione di passaggio pari a 100 cm^2 , poste ad un'altezza pari di 1.8 metri negli alloggi piano terra e ad un'altezza pari a 2.25 metri dal pavimento al primo e secondo piano. Il valore di n è stato assunto pari a 0.5 mentre il coefficiente di scarico pari a 0.6.

Inizialmente il camino solare e il lucernario sono stati considerati come condotti d'aerazione considerando le rispettive altezze di 2.2 m e 0.45 m, tuttavia, a causa dei limiti della Type97

che non permette di sfruttare a pieno tutte le funzionalità di CONTAM, anch'essi sono stati considerati come degli orifizi con area di passaggio rispettivamente 0.73 m^2 e 0.37 m^2 , cioè pari alle sezioni di sbocco.

Capitolo 5

Confronto tra risultati del modello e dati misurati

I modelli energetici degli edifici costituiscono una componente fondamentale nell'ambito dei calcoli di conformità normativa, svolgendo un ruolo cruciale nel verificare se un edificio rispetta i rigidi requisiti e le normative energetiche stabilite dalle leggi e dai regolamenti governativi. La calibrazione dei modelli energetici, quindi, emerge come un passaggio di cruciale importanza al fine di garantire che le previsioni basate sui risultati di simulazione siano attendibili e rispecchino adeguatamente le condizioni reali di funzionamento. La discrepanza tra dati sperimentali e simulati, comunemente nota come "Building energy performance gap," può avere origine da diverse fonti, quali errori di progettazione, comportamenti degli occupanti, inefficienze nei sistemi energetici e fluttuazioni climatiche. Tale discrepanza è stata oggetto di un approfondito studio condotto da Ahmad e Culp nel 2006 [45], il quale ha messo in luce come la mancanza di calibrazione possa portare a discrepanze anche considerevoli, fino al 90%, tra i dati monitorati e quelli calcolati, in particolare per gli usi finali di acqua calda sanitaria ed elettricità.

4.1 Calibrazione del modello

Le principali cause di discrepanza tra le prestazioni energetiche reali e quelle previste derivano da:

- Assunzioni dovute ad una mancanza di informazioni;
- Semplificazioni del modello;
- Incertezza operativa, derivante dalla mancanza di feedback riguardo all'uso effettivo dei vari sistemi presenti all'interno degli edifici;
- Incertezza introdotta dalle specifiche condizioni di input nei modelli, come le condizioni meteorologiche e i dati sull'occupazione dell'edificio.

In letteratura, esistono numerosi metodi analitici nel contesto delle simulazioni energetiche per migliorare la calibrazione e la validazione dei modelli.

Avendo a disposizione dati dettagliati con un intervallo di acquisizione di dieci minuti forniti dalla rete di sensori installato nell'alloggio, la calibrazione è stata condotta impiegando le variabili monitorate, quali temperatura interna e potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore, al fine di verificare l'accuratezza del modello. Si è quindi proceduto ad una calibrazione manuale per tentativi, in cui sono stati regolati i parametri di maggiore incertezza che avevano un impatto significativo sul modello.

L'ASHRAE Guideline 14 [1] fornisce indicazioni specifiche per valutare l'accuratezza del modello calibrato, utilizzando due indicatori chiave: Mean Bias Error (**MBE**) e Coefficient of the Variation of the Root Mean Square Error (**CVRMSE**).

(MBE) rappresenta la media degli errori durante il periodo di simulazione. Generalmente, indica il “bias” complessivo del modello, ovvero quanto le previsioni del modello tendono a scostarsi in media dai dati osservati. Nell'equazione (1), m_i è il valore misurato, s_i il valore simulato, n è il numero totale di valori misurati. Quindi, valori positivi indicano una tendenza del modello a sottostimare i dati reali, mentre valori negativi significa che tende a sovrastimarli.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (m_i - s_i)}{n} * 100 \quad (1)$$

La limitazione principale di questo indice è data dal fenomeno di “cancellazione”, ossia gli errori positivi e negativi si compensano a vicenda, portando ad un valore di MBE che potrebbe non riflettere accuratamente la bontà del modello. Quindi, il BME potrebbe risultare vicino a zero anche se il modello ha errori significativi. Il NMBE (“Normalized Mean Bias Error”) rappresenta, invece, una misura normalizzata del MBE, ottenuta dividendolo per il valore medio dei valori misurati, in modo da rendere i risultati comparabili indipendentemente dalle unità di misura utilizzate.

$$NMBE (\%) = \frac{1}{\bar{m}} * \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (m_i - s_i)}{n - p} * 100 \quad (2)$$

Nell'equazione (2), il termine "p" rappresenta il numero di parametri aggiustabili del modello. Tuttavia, si suggerisce di impostare il valore di "p" a 0 nel contesto della calibrazione. A causa di questo fenomeno di compensazione, al fine di ottenere una valutazione completa della qualità del modello, è necessario utilizzare anche il Coefficient of the Variation of the Root Mean Square Error (CVRMSE) (3), che misura la variabilità degli errori tra i valori misurati e simulati. In questo caso il valore di p viene suggerito pari a uno.

$$CV(RMSE) (\%) = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_i} (m_i - s_i)^2}{n - p}} * 100 \quad (3)$$

È sempre positivo e, a causa dell'elevamento al quadrato, tende a massimizzare l'impatto degli errori importanti rispetto agli errori più piccoli.

Secondo le linee guida ASHRAE, un modello risulta propriamente calibrato se NMBE e CVRMSE risultano inferiori, rispettivamente, al 10% e al 30% [Tab.35]. Questi valori definiscono i criteri di accettabilità.

Tabella 35 - Criteri di validazione ASHRAE

Organizzazione	Calibrazione su base mensile		Calibrazione su base oraria	
	CV(RMSE) [%]	NMBE [%]	CV(RMSE) [%]	NMBE [%]
ASHRAE – Guideline 14	15	5	30	10

Al fine di valutare la bontà di un modello di simulazione, l'uso di dati temporali estesi non è sempre necessario. Invece, è possibile adottare un approccio più mirato, prendendo in considerazione un breve periodo di almeno due giorni rappresentativi. Questo approccio segue un metodo induttivo, partendo dal particolare per poi generalizzare. Iniziamo con l'analisi dettagliata dei dati e delle simulazioni su tre giorni rappresentativi. Questo fornisce una base solida per valutare quanto bene il modello riesca a riprodurre il comportamento reale dell'oggetto di studio. Una volta confermata l'accuratezza del modello su questa scala ridotta, è possibile estendere l'analisi a un periodo di simulazione più lungo per verificarne l'affidabilità a lungo termine.

L'analisi inizia con i dati provenienti dal sistema di monitoraggio. Questi dati vengono attentamente esaminati per identificare eventuali errori di misurazione, i quali vengono successivamente sottoposti a un processo di rimozione, garantendo così l'utilizzo di dati convalidati. Questa procedura mira a ridurre l'incertezza derivante da possibili malfunzionamenti dei sensori. Attraverso l'analisi di questi dati, oltre a ottenere informazioni sulle temperature interne, potenze assorbite e consumi energetici, emerge la possibilità di acquisire preziose informazioni relative al comportamento degli inquilini e sul funzionamento dei sistemi HVAC. Successivamente, viene condotta una prima simulazione del modello di base, utilizzando dati di input che includono le proprietà termofisiche dell'involucro, i carichi interni, le assunzioni relative ai sistemi HVAC e i dati ottenuti da fonti documentate, oltre alle assunzioni sui carichi interni e schedule occupazionali. È essenziale tenere presente che ciascuno di questi input è associato a un certo grado di incertezza, il quale influirà sugli output del sistema di base. Gli output del modello di base, che includono le temperature interne, le potenze assorbite dalla PdC e i consumi energetici, sono confrontati con i dati effettivamente misurati dai sensori. La calibrazione del modello è ritenuta riuscita quando le prestazioni del modello soddisfano i criteri stabiliti dalle linee guida fornite da ASHRAE.

Nel caso in cui il modello non risulti adeguatamente calibrato, si procede attraverso iterazioni successive, con la modifica dei parametri con maggiore grado di incertezza, basandosi sull'analisi dei dati di monitoraggio. Questo processo viene ripetuto fino a raggiungere un livello accettabile di calibrazione del modello. Una volta che il modello è stato calibrato con successo, si possono effettuare valutazioni dettagliate sul comportamento dinamico dei sistemi all'interno del modello.

Ovviamente è necessario adottare un approccio ampio e integrato per la valutazione del modello, andando oltre la mera considerazione degli indici di calibrazione forniti da ASHRAE, al fine di ottenere visione complessiva e completa delle prestazioni del sistema, tenendo conto delle dinamiche e delle complessità che possono emergere nel contesto di un ambiente reale. Il metodo viene sintetizzato in Fig.57.

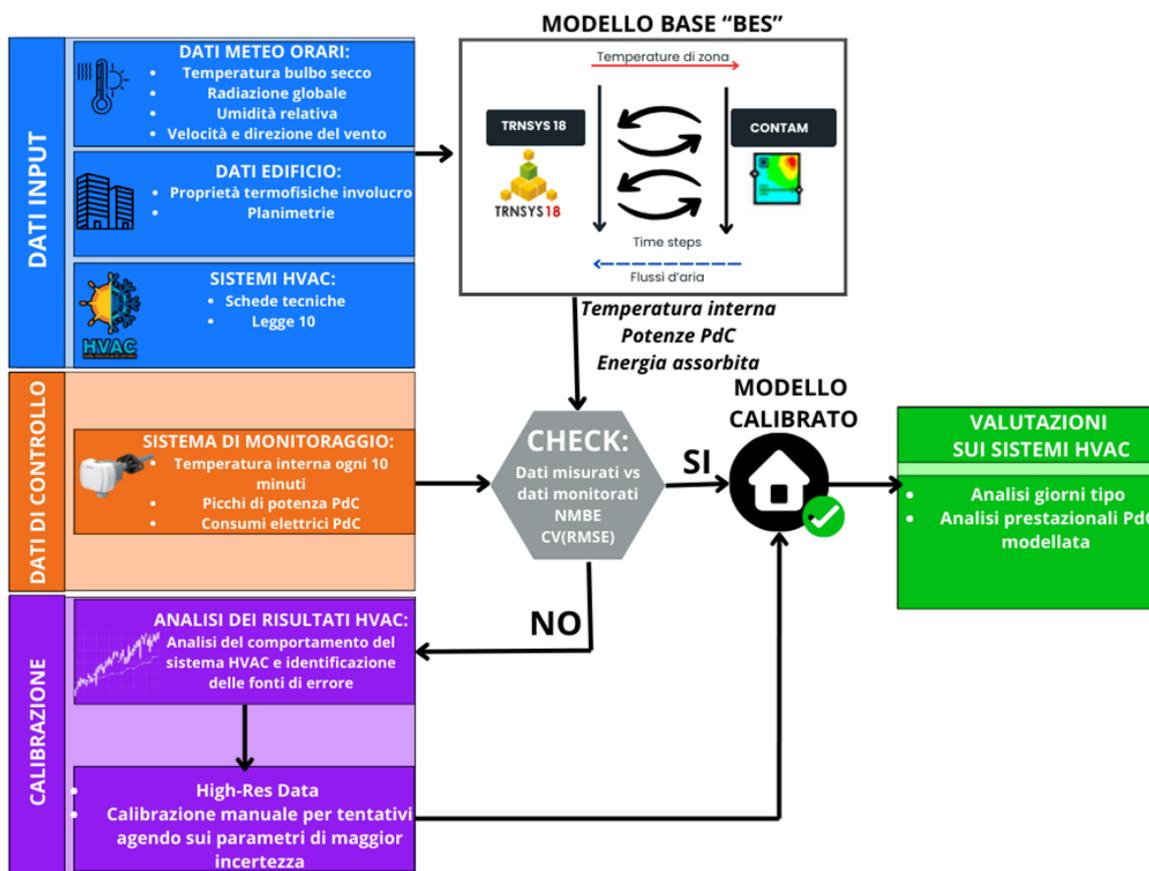


Figura 57 - Schema di calibrazione

Esaminando attentamente il grafico in Figura [58] che illustra l'andamento della temperatura misurata, simulata ed esterna per il mese di marzo, è possibile affermare che la temperatura interna dell'edificio simulata dal modello è accettabile, con uno scostamento massimo di 1.7°C , che si verifica alle 23:00 del 02/03 (i primi tre giorni non risultano simulati in maniera adeguata), ed uno scostamento medio di 0.148°C (in valori assoluti). Le curve che rappresentano la temperatura simulata e quella misurata mostrano una notevole coerenza e seguono una tendenza simile lungo l'intero periodo. Tuttavia, è possibile notare delle piccole discrepanze in alcuni giorni (8, 12 e 16 marzo) che sono attribuibili a problemi tecnici temporanei nel sistema di monitoraggio. Infatti, durante questo periodo, il sistema di monitoraggio ha presentato dei buchi nelle misurazioni, e una volta ripreso a funzionare, ha attraversato un periodo transitorio durante il quale doveva stabilizzarsi. Di conseguenza, i valori di temperatura simulati in quei giorni potrebbero apparire compromessi e divergere leggermente dai dati effettivi. Queste variazioni, sebbene presenti, non sembrano essere significative e non compromettono l'attendibilità generale del modello.

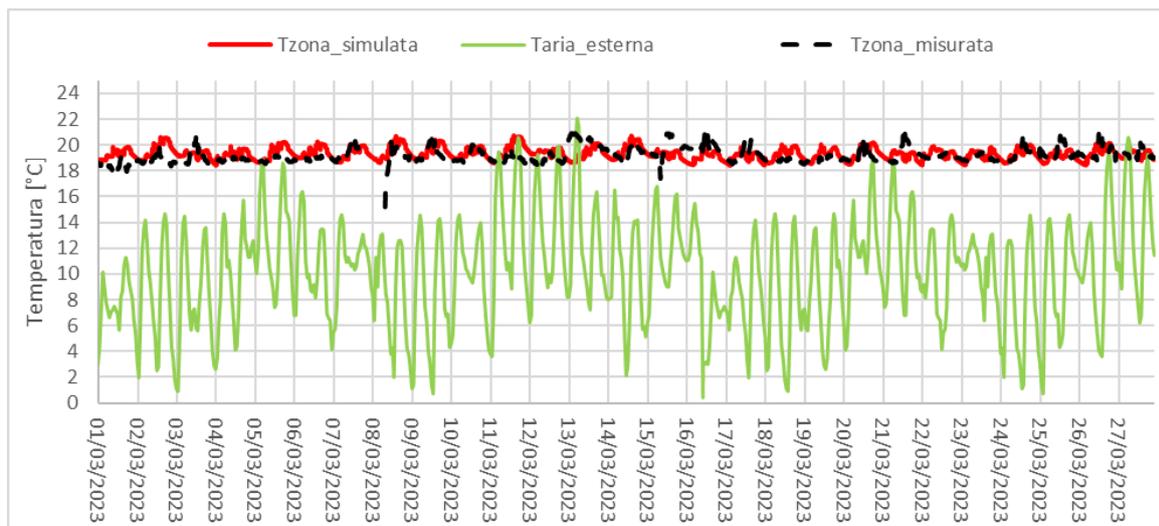


Figura 58 - Andamento della temperatura misurata, simulata e dell'aria esterna per il mese di marzo.

I risultati ottenuti hanno rivelato un CVRMSE del 0.035 e un NMBE del 0.007 per la previsione della temperatura interna, suggerendo quindi che il modello offre un'ottima approssimazione ai dati reali, nonostante le discrepanze dovute al sistema di monitoraggio. Per quanto concerne l'energia elettrica, è stato osservato un valore di NMBE pari al 4,66% (Tab.36), posizionandosi al di sotto dei limiti definiti nelle linee guida ASHRAE. Tuttavia, per quanto riguarda il CVRMSE, si è riscontrato un valore al di fuori delle soglie raccomandate.. Ciò è attribuibile a un'assunzione inclusa nel modello, la quale riguarda la gestione dell'acqua calda sanitaria. Questa assunzione è stata incorporata con l'obiettivo di rendere il modello più generale, consentendo un'indipendenza dai dati di monitoraggio. Inoltre, va notato che il nostro approccio implica l'uso di un file meteo proveniente da una località diversa e comporta assunzioni relative al funzionamento della pompa di calore e ai set point di zona.

Ciò è attribuibile a un'assunzione inclusa nel modello, la quale riguarda la gestione dell'acqua calda sanitaria. Questa assunzione è stata incorporata con l'obiettivo di rendere il modello più generale, consentendo un'indipendenza dai dati di monitoraggio. Inoltre, va notato che il nostro approccio implica l'uso di un file meteo proveniente da una località diversa e comporta assunzioni relative al funzionamento della pompa di calore e ai set point di zona. Infatti, si è assunto che i prelievi d'acqua per l'ACS seguano un "profilo tipo", ricavato attraverso l'analisi dei dati di monitoraggio, in cui l'orario di accensione della pompa di calore per l'ACS sia fisso e identico per tutti i giorni del mese. Tuttavia, nella realtà, gli utenti potrebbero avere abitudini diverse e i prelievi di acqua calda sanitaria potrebbero verificarsi

a orari variabili, portando a dei picchi di potenza in istanti di tempo non allineati a quelli del modello. La Figura 59 mostra chiaramente come le accensioni della pompa di calore per il riscaldamento siano sincronizzate tra modello e realtà, mentre quelle per la produzione di acqua calda sanitaria non lo siano, a causa delle differenze negli orari effettivi di prelievo che sono aleatori e difficili da modellare con precisione in quanto dipendenti dalle abitudini degli occupanti.

Tabella 32 - Riepilogo indici di calibrazione ottenuti

Periodo	Energia elettrica assorbita PdC [kWh]		Temperatura [°C]
	Misurata	Simulata	RMSE [°C]
Marzo	79.98	76.26	0.67

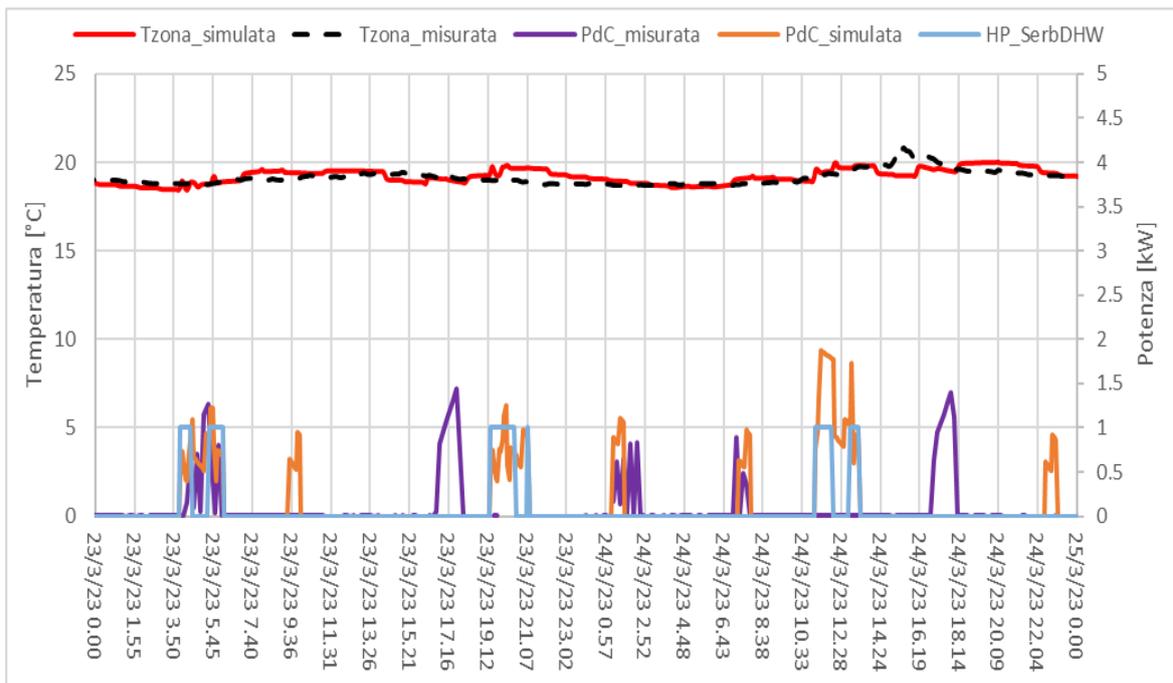


Figura 59 - Asse di sinistra: Aandamento temperatura simulata, misurata., Asse di destra: potenza assorbita dalla pompa di calore simulata e misurata, accensione pompa di calore dovuta all'ACS

4.2 Analisi pompa di calore

Per valutare le prestazioni della pompa di calore, vengono utilizzati dei coefficienti di prestazione stagionali (Seasonal Performance Factors - SPF), che consentono di calcolare le prestazioni sia durante la stagione invernale, attraverso il Seasonal Coefficient of Performance (SCOP), sia durante la stagione estiva, mediante il Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER). Il COP rappresenta il rapporto tra l'energia termica ceduta all'ambiente (condensatore) e l'energia elettrica assorbita dal compressore durante il riscaldamento invernale. L'EER, invece, è il rapporto tra l'energia termica estratta dall'edificio (evaporatore) e l'energia elettrica assorbita dal compressore durante la stagione estiva. Nel nostro caso, la pompa di calore viene usata solamente per la stagione invernale.

Dai risultati delle simulazioni si sono ottenuti i valori di SCOP per il mese di marzo e per le singole settimane (Tab.33):

Tabella 33 - Valori di temperatura media esterna, SCOP totale, SCOP_{RISC} e SCOP_{ACS} per le diverse settimane di marzo e per il mese completo

PERIODO	$\bar{T}_{esterna}$ [°C]	$SCOP_{TOT}$	$SCOP_{ACS}$	$SCOP_{RISC}$
01/03 – 07/03	8.21	3.86	3.19	4.61
08/03 – 14/03	11.36	3.87	3.40	4.39
15/03 – 21/03	9.29	3.66	3.17	4.17
22/03 – 27/03	13.67	3.82	3.25	4.49
01/03 – 27/03		3.80	3.25	4.40

Per quanto riguarda la modalità riscaldamento, sono distinte le prestazioni della macchina per la produzione di ACS e per il riscaldamento ambiente. È chiaro come il $SCOP_{DHW}$ risulti essere inferiore del $SCOP_{RISC}$, dovuto alle temperature di mandata più elevate quando la macchina lavora in modalità ACS.

Le prestazioni della pompa di calore sono influenzate dal clima e dalle condizioni operative. Tuttavia, in questa situazione specifica, le prestazioni sembrano anche essere influenzate dal sovradimensionamento dell'unità installata che risulta essere sovradimensionata rispetto alle reali esigenze dell'appartamento. Questo significa che la pompa di calore funziona per la

maggior parte del tempo con un carico molto ridotto, approssimativamente al 40% della sua capacità massima, come indicato nella Fig.60. Questo evidenzia chiaramente un problema di sovradimensionamento dell'unità rispetto alle reali esigenze dell'ambiente durante le mezze stagioni. È importante sottolineare che ulteriori analisi più dettagliate sarebbero auspicabili per i mesi più critici, come gennaio e febbraio, che si prevede invece di affrontare nel prossimo anno, quando saranno a disposizione ulteriori dati per supportare questa valutazione.

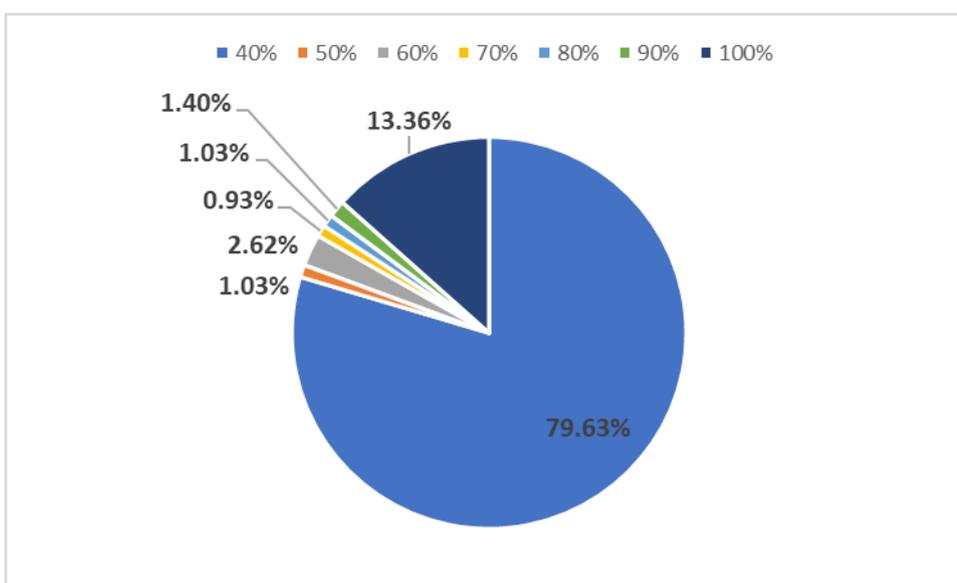


Figura 60 - Frequenza di funzionamento della macchina

Nei nuovi edifici ben isolati, di solito si osserva una significativa riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento degli spazi, che può arrivare fino al 79%. Tuttavia, il problema si sposta durante la stagione estiva, in cui l'energia richiesta per il raffreddamento degli spazi rimane stabile o può persino aumentare del 30%. In questo contesto, la scelta della pompa di calore dovrebbe essere stata orientata verso la stagione più severa, ovvero l'estate. Tuttavia, in questo specifico caso, il raffreddamento non è affidato alla pompa di calore, nonostante sia reversibile, ma a sistemi di raffrescamento passivi.

In Fig.61 sono presentati i dati misurati e valori simulati della temperatura dell'aria del soggiorno e della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore. È mostrata inoltre la temperatura dell'aria esterna, la temperatura di mandata della pompa di calore simulata e le accensioni della pompa di calore in modalità ACS. È evidente, come evidenziato in rosso,

che la logica di controllo implementata per dare priorità all'Acqua Calda Sanitaria (ACS) rispetto al riscaldamento dell'ambiente operi in modo efficace. Quando la pompa di calore è in modalità riscaldamento e si rende necessaria l'ACS, essa sospende immediatamente la modalità di riscaldamento e passa direttamente alla modalità ACS, incrementando la temperatura di mandata fino a 48°C.

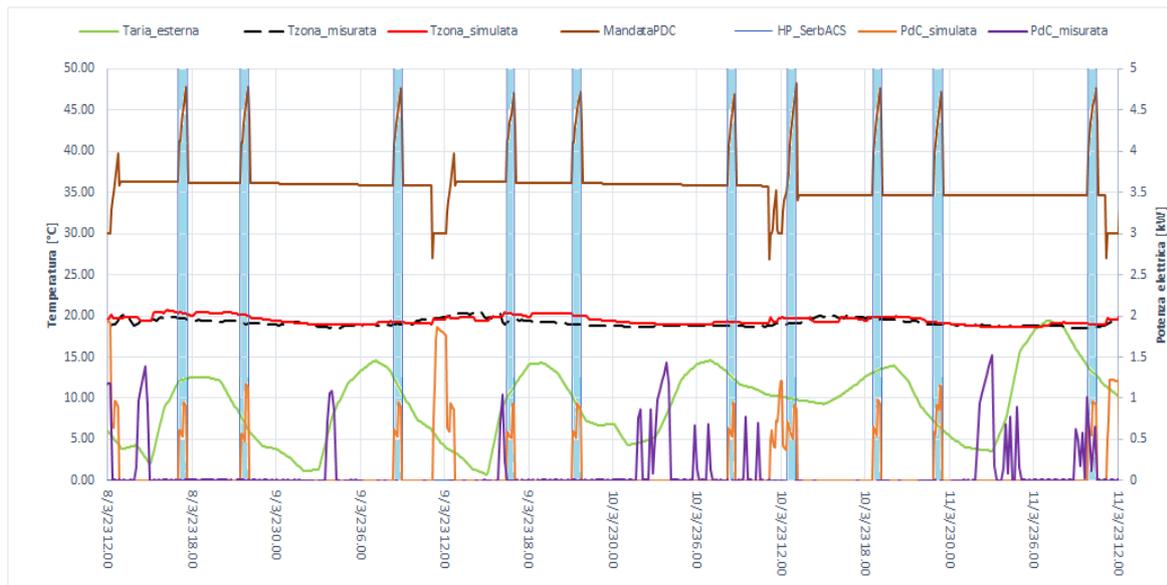


Figura 61 - Andamento della temperatura dell'aria esterna, temperatura di zona misurata e simulata, temperatura di mandata della PdC, potenza elettrica assorbita dalla PdC e le accensioni della PdC in modalità ACS rappresentate come aree.

La Fig.62 illustra l'andamento della temperatura dell'acqua in ingresso nel radiante, la temperatura dell'aria nel soggiorno e il controllo dell'accensione del sistema radiante per una giornata invernale (11 marzo). Risulta interessante notare come la temperatura in ingresso al sistema radiante venga attentamente regolata in risposta alle condizioni termiche della zona termica. In particolare, quando la temperatura della zona termica raggiunge i 35°C, il sistema inizia a ridurre gradualmente la temperatura dell'acqua in ingresso fino a stabilizzarla a 30°C. Questa regolazione è finalizzata a garantire che la temperatura nella stanza rimanga costantemente a 20°C. Inoltre, si può osservare un ritardo temporale tra il momento in cui si attiva il controllo (alle 11:00) e il raggiungimento del set-point desiderato di 20°C nel soggiorno. Questo ritardo riflette l'inerzia termica del sistema radiante, il quale impiega circa 20 minuti per adeguarsi alle variazioni di temperatura desiderate.

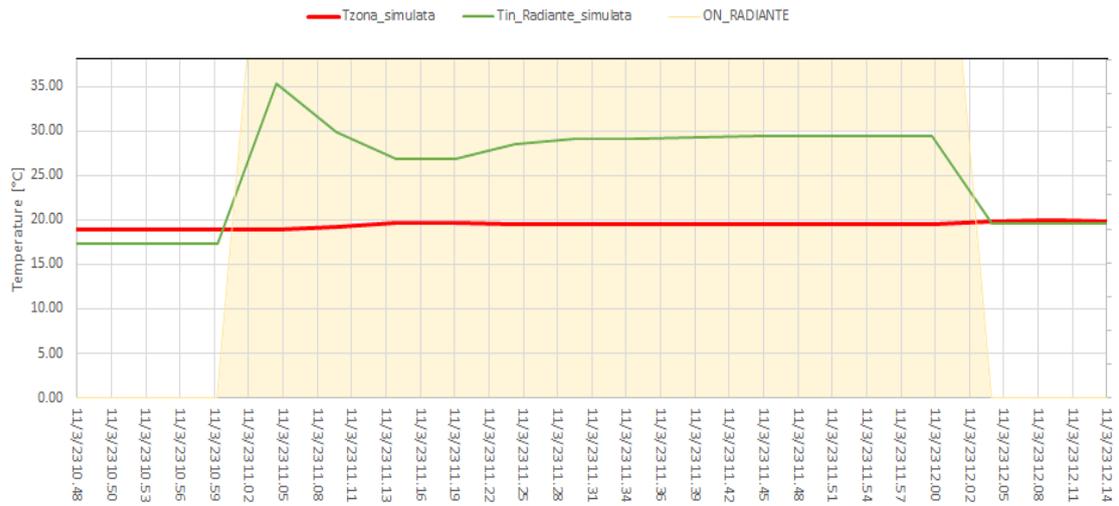


Figura 62 - Temperatura in ingresso del radiante, temperatura dell'aria nel soggiorno e controllo di accensione radiante

Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi costituisce un tassello fondamentale di un progetto di ricerca sperimentale più ampio, che affronta una varietà di tematiche rilevanti per l'ambito dell'edilizia sostenibile. Le quattro principali aree di studio comprendono:

- Il benessere termo-igrometrico
- Le valutazioni energetiche
- I sistemi di ventilazione
- Tetto verde

Di queste quattro macro-tematiche, con il seguente lavoro di tesi, sono state trattate le prime tre. Attraverso il sistema di monitoraggio installato nei soggiorni dei dodici alloggi, ognuno caratterizzato da un diverso sistema di ventilazione, sono state elaborate valutazioni energetiche di qualità dell'aria interna considerando due periodi di analisi: marzo, per la stagione invernale, e agosto, per quella estiva. Per ciascuna categoria di appartamenti sono stati ricavati i profili medi delle diverse grandezze, con differenziazione tra feriale e week-end, e i dati statistici, quali media, mediana, deviazione standard, massimi, minimi e quartili.

- Nel contesto dell'analisi stagionale invernale, l'attenzione è stata focalizzata esclusivamente sugli alloggi del primo blocco monitorato (blocco C), in quanto gli unici disponibili. I risultati emersi da questa analisi hanno rivelato alcune criticità, in particolare nell'appartamento 5A, dotato di un sistema di ventilazione meccanica a doppio flusso. Per il mese di marzo, è stato osservato che l'appartamento 5A presentava una percentuale di ore in categoria IV di qualità dell'aria pari al 10%, mentre, gli appartamenti dotati di ventilazione naturale, non hanno mostrato alcuna percentuale di ore in questa categoria. L'ipotesi formulata riguardo a questa discrepanza è che potrebbe esserci stato un mancato utilizzo o un utilizzo sporadico del sistema di ventilazione meccanica. Se si prende come riferimento il limite di 1000 ppm, sulla base di quanto suggerito da Von Pettenkofer, nell'appartamento 5A il 55% delle ore di marzo sono sopra questo limite, mentre gli appartamenti 20E, 21E e 22C rispettivamente 4.6%, 1.9% e 16.5%. Durante l'analisi della concentrazione di particolato sospeso PM10 durante la stagione invernale, è da notare che mancano i dati dell'appartamento 5A, ma sono presenti quelli relativi all'appartamento 6A, dotato di un sistema di ventilazione meccanica a singolo flusso. Si osserva una dinamica comportamentale simile a quella riscontrata con la CO₂. In particolare, l'appartamento con il

sistema di ventilazione meccanica (6A) emerge come l'alloggio più critico in termini di concentrazione di PM10. Per 15 giorni del mese di marzo, la concentrazione di PM10 in questo appartamento supera i limiti normativi, indicando una situazione di non conformità. Al contrario, gli appartamenti 20E, 21E e 22C, dotati di ventilazione naturale, rispettivamente superano i limiti per 2 giorni, 2 giorni e 0 giorni durante lo stesso periodo.

- Durante l'analisi estiva, si è notato una tendenza generale di miglioramento delle concentrazioni di CO₂. Questa migliorata qualità dell'aria è attribuibile alla necessità di controllare le temperature interne negli alloggi, dato che questi sono dotati di sistemi di raffrescamento passivo. Questa esigenza ha portato gli occupanti ad utilizzare i sistemi di ventilazione in modo più frequente. Tuttavia, va sottolineato che l'appartamento 23C è un'eccezione a questa tendenza positiva. Questo appartamento ha mostrato un peggioramento delle condizioni dell'IAQ, con una percentuale di ore in categoria IV pari al 45.5%, mentre gli altri alloggi sono rientrati sempre nelle categorie inferiori. La causa di questa situazione può essere ricondotta all'installazione di uno split per il raffrescamento estivo nell'appartamento 23C. Questa decisione ha comportato una riduzione significativa dell'utilizzo dei sistemi di ventilazione passiva, con conseguente limitazione del ricambio d'aria, portando ad una disparità rispetto agli altri alloggi che hanno mantenuto un ricambio d'aria più efficiente attraverso i sistemi di ventilazione passiva.

Per quanto riguarda l'analisi dati relativa a PM10, è emerso che solamente l'appartamento 5A supera il valore limite di esposizione per un totale di 14 giorni ad agosto, gli altri alloggi invece non mostrano criticità.

Nonostante le elevate concentrazioni di CO₂ e PM10 all'interno di determinati alloggi, le persone sembrano non percepire la scarsa qualità dell'aria e non avvertono la necessità di evitare tali ambienti. Inoltre, si è notato che durante la stagione invernale, gli alloggi dotati di sistemi di ventilazione naturale tendono a offrire un comportamento migliore in termini di qualità dell'aria rispetto a quelli con sistemi di ventilazione meccanica. Questo risultato può essere attribuito al fatto che, nella percezione comune, spesso si attribuisce una priorità eccessiva al contenimento della spesa energetica. Questa enfasi sul risparmio energetico porta a relegare in secondo piano l'importanza della qualità dell'aria e della ventilazione. Una possibile spiegazione per questa situazione è che esista una certa riluttanza ad attivare i sistemi di ventilazione meccanica, presumibilmente a causa della sottostima degli effetti di

una scarsa qualità dell'aria e del timore che questi sistemi possano comportare un consumo eccessivo di energia.

Non si sono fatte valutazioni sui consumi elettrici effettivi dei sistemi di ventilazione meccanica in quanto non si era a disposizione delle schede tecniche, tuttavia, il consumo di una macchina VMC varia tra i 3.6 W e i 20 W, in funzione della portata d'aria. Supponendo una VMC sempre accesa e un consumo energetico di 6 Watt all'ora, cioè con portate d'aria tra la seconda e la terza velocità, si stima un consumo giornaliero di 144 Wh, il che significa poco più di 0.05 € al giorno [46].

Questi risultati sottolineano l'importanza di educare e sensibilizzare gli inquilini degli alloggi dotati di VMC.

- Per quanto riguarda l'umidità relativa, l'analisi dati ha dimostrato che i livelli si mantengono costantemente all'interno del range raccomandato tra il 30% e il 70%, indipendentemente dal sistema di ventilazione adottato, in entrambe le stagioni.

- L'analisi dei dati relativi al comfort termico durante la stagione estiva ha rivelato che, in generale, gli alloggi situati al piano terra mostrano un minor numero di ore trascorse in condizioni di discomfort rispetto a quelli situati ai piani superiori. Questa disparità può essere attribuita al fatto che gli alloggi al piano terra non sono direttamente esposti alla radiazione solare, poiché sono ombreggiati dalla struttura degli appartamenti situati ai piani superiori. Inoltre, attraverso il modello di comfort termico adattivo, emerge che i sistemi di ventilazione naturale non sono in grado di sostituire completamente i sistemi di climatizzazione; tuttavia, essi possono contribuire significativamente a contenere i consumi energetici. La presenza di sistemi di condizionamento può influenzare il comportamento degli utenti, spingendoli ad affidarsi a tali sistemi anche quando alternative più sostenibili, come la ventilazione naturale, potrebbero essere altrettanto efficaci nel mantenere un ambiente confortevole. Questo comportamento spesso comporta un consumo di energia che potrebbe essere facilmente evitato. Un esempio di questo comportamento è dato dall'appartamento 23C.

Successivamente, è stato sviluppato un modello dinamico integrato impianto-edificio, e opportunamente calibrato e validato sulla base dei dati di monitoraggio, che rappresenta un importante strumento per le fasi successive del progetto, consentendo simulazioni e

ottimizzazioni mirate al miglioramento delle prestazioni degli edifici. Il processo di calibrazione del modello ha rivelato che i valori uno scostamento massimo di 1.7 °C e uno scostamento medio di 0.148°C per la temperatura , mentre per l'energia elettrica assorbita dalla pompa di calore si è ottenuto uno scostamento mensile del 4.66% invece il CV(RMSE) fuori dai limiti ASHRAE, indicando che il modello non poteva essere considerato completamente calibrato con successo.

Nel contesto della calibrazione di modelli complessi, emergono sfide significative dovute alla necessità di gestire un elevato numero di input, spesso caratterizzati da variabili non del tutto note, che richiedono delle assunzioni. Tale complessità rappresenta un ostacolo intrinseco alla realizzazione di una calibrazione completa e precisa. Tuttavia, è necessario considerare il modello nella sua totalità, inclusi i suoi aspetti dinamici e si è osservato che i sistemi tendono a funzionare in maniera realistica entro i limiti delle assunzioni previste e delle condizioni di progetto. Pertanto, una valutazione completa di tali modelli richiede non solo la calibrazione dei parametri ma anche un'approfondita analisi del comportamento dinamico del sistema.

Nonostante il modello offra un'ottima approssimazione dei dati reali, è possibile affinarlo ulteriormente andando ad agire sui parametri con maggior incertezza. Si ritiene che ulteriori regolazioni possano essere possibili in una seconda fase di processo in cui questi parametri di input vengono affinati.

Questi includono:

- Dati meteorologici: Nel modello impiegato, a causa dell'assenza di dati meteorologici direttamente riferiti a Vigonza, la posizione reale dell'alloggio soggetto all'analisi, si è fatto ricorso ai dati provenienti dalla stazione meteorologica di Legnaro, la quale offriva una maggior completezza di informazioni ambientali. Tuttavia, va evidenziato che Legnaro è situata a una distanza considerevole, pari a 20 km, da Vigonza ed è chiaro che rappresenti una fonte di incertezza piuttosto rilevante. Al fine di perfezionare ulteriormente il modello, potrebbe essere opportuno valutare l'installazione di sensori direttamente nell'area circostante l'edificio, consentendo la misurazione in tempo reale dei dati meteorologici necessari al modello. Questo potrebbe diventare una prospettiva di miglioramento, specialmente considerando che il programma di sperimentazione non si esaurisce con il presente lavoro di tesi ma si estenderà ad ulteriori analisi, comprese quelle relative al tetto verde e all'installazione di flussimetri.

- Pompa di calore: La modellazione della pompa di calore si è basata sulle informazioni fornite dal costruttore in condizioni nominali, da cui poi si è ottenuto il comportamento a carico parziale secondo Fuentes [39]. Tuttavia, alcune variabili critiche restano non note, come la regolazione della temperatura di mandata della pompa di calore, che potrebbe essere basata su una temperatura fissa impostata dall'utente o su una curva climatica. Inoltre, è importante notare che il modello attuale non tiene conto del fenomeno dello sbrinamento e del suo impatto sul COP della pompa di calore. Questa omissione potrebbe essere accettabile per il periodo di simulazione di marzo, caratterizzato da temperature non critiche. Tuttavia, per valutazioni più complete e rappresentative, sarebbe consigliabile integrare nel modello anche il comportamento durante il processo di sbrinamento. Questo aspetto diventa particolarmente rilevante per le analisi previste nei mesi più freddi, come gennaio e febbraio. Durante tali periodi, le condizioni operative possono variare notevolmente, rendendo cruciale la modellazione del comportamento della pompa di calore durante il processo di sbrinamento. Questa aggiunta consentirebbe di ottenere valutazioni più precise e dettagliate, soprattutto quando si disporrà di dati monitorati più completi.
- Sistema radiante: Un aspetto significativo riguarda il passo tra i tubi del pavimento radiante, il quale non è specificato in nessuna documentazione tecnica disponibile. Di conseguenza, si è proceduto con un'assunzione, ipotizzando un passo dei tubi pari a 15 cm.
- Set-point dell'aria ambiente: Nel contesto delle simulazioni condotte, è stata adottata un'equazione che regolava la temperatura di set-point in funzione dell'ora, emulando il funzionamento di un termostato a 5 fasce orarie e interrompendo il condizionamento termico quando la temperatura esterna raggiungeva i 18°C. È fondamentale specificare che non si aveva conoscenza dell'effettiva dead band del termostato, ovvero la gamma di temperatura entro cui il termostato mantiene il sistema di riscaldamento. Per migliorare l'accuratezza delle simulazioni e renderle più aderenti alla realtà, potrebbe essere opportuno acquisire informazioni sulle specifiche impostazioni dei termostati utilizzati nell'edificio in esame.
- ACS: Attualmente, il modello opera sulla base di un "profilo tipo" derivato dall'analisi dei dati di monitoraggio, con un orario di accensione fisso e identico per tutti i giorni del mese. Tuttavia, la vera variabilità delle abitudini degli utenti può portare a picchi di consumo di ACS in momenti diversi, al di fuori dei parametri del modello. Pertanto, è auspicabile considerare l'implementazione di una metodologia più flessibile, in grado di adattarsi alle abitudini individuali e ai picchi di consumo effettivi. Questo potrebbe

comportare la raccolta di dati più dettagliati sull'uso dell'ACS da parte degli utenti, al fine di calibrare il modello in modo più accurato.

- Carichi interni: I carichi interni dovuti ai dispositivi elettrici all'interno di ciascuna zona sono attualmente stimati sulla base di appartamenti tipo, e seppur questo rappresenti un punto di partenza valido, potrebbe essere soggetto a miglioramenti. Per accrescere l'accuratezza delle stime, si potrebbe valutare la realizzazione di una campagna di misurazione a breve termine. Tale iniziativa potrebbe fornire informazioni dettagliate riguardo ai profili di consumo elettrico legato all'utilizzo delle apparecchiature specifici di ciascuna zona. Un ulteriore approccio, anche se meno accurato, potrebbe prevedere un sopralluogo all'interno degli alloggi di interesse, al fine di identificare e caratterizzare i dispositivi elettrici in uso.

- Occupazione delle zone: L'occupazione delle zone è basata su numeri di occupanti teorici e su un programma settimanale di occupazione tipo; è innegabile che la conoscenza precisa della presenza effettiva di un certo numero di occupanti in un dato momento rappresenterebbe un notevole progresso nell'aumento dell'accuratezza delle simulazioni per quanto concerne i carichi interni impostati.

Per quanto riguarda la modellazione in TRNSYS, è importante considerare le raccomandazioni e le considerazioni emerse per migliorare la precisione e la rappresentatività del modello. Nella creazione del modello di ventilazione degli alloggi in CONTAM, è stata necessaria l'introduzione di alcune semplificazioni al fine di gestire la complessità della simulazione, di seguito riportate:

- Il sistema di ventilazione meccanica a singolo flusso è stato considerato sempre acceso, in quanto non era disponibile alcun feedback sull'effettivo utilizzo. Inoltre, è stata assunta una portata di estrazione pari a $15 \text{ m}^3/\text{h}$, conforme alla normativa specifica (Legge 10), anche se questo valore potrebbe sollevare alcune incertezze, in quanto leggermente basso. Da notare che i dettagli sul consumo energetico del sistema di estrazione non erano disponibili, rendendo difficile la sua inclusione nel modello.

- Le bocchette di immissione igroregolabili sono state modellate come "orifici" (*Orifice Area Data*) con una sezione di passaggio di 100 cm^2 . Questa rappresentazione è stata adottata in assenza di informazioni dettagliate sulle specifiche tecniche di tali bocchette riguardo ai valori di portata che le attraversa in funzione della differenza di pressione ai lati.

- È stata ulteriormente semplificata la modellazione considerando le porte e le finestre come costantemente chiuse per l'intero periodo di simulazione. Questa scelta è stata

effettuata in considerazione del fatto che il sistema di ventilazione meccanica controllata è concepito per offrire una ventilazione accuratamente gestita, minimizzando la necessità di aprire finestre per il ricambio d'aria. Tuttavia, in alcune situazioni, gli occupanti dell'alloggio potrebbero decidere di aprire le finestre per scopi di ventilazione aggiuntiva o per altre ragioni. In futuro, potrebbe essere utile considerare scenari più complessi in cui le finestre vengono aperte in modo intermittente o controllato, magari in risposta a particolari condizioni ambientali o esigenze degli occupanti. Questo potrebbe essere parte di una modellazione più dettagliata del comportamento degli occupanti e delle dinamiche di ventilazione nell'alloggio.

Nella modellazione integrata TRNSYS-CONTAM è stata utilizzata la Type97 nel software di simulazione energetica. Date le limitazioni di quest'ultima, la Type98 potrebbe essere sfruttata in futuro per una simulazione combinata più accurata e con maggiori potenzialità. Infatti, essa tiene conto della reale geometria tridimensionale nell'importazione del modello di ventilazione in TRNSYS, permettendo di includere con maggior dettaglio il funzionamento del camino solare e del lucernario. Inoltre, renderebbe possibile anche modellare la generazione di contaminanti da varie fonti e prevedere come essi si diffondono all'interno dell'ambiente, oltre che fornire una stima dell'esposizione degli occupanti agli inquinanti stessi. L'implementazione di queste funzionalità rappresenterebbe un'interessante prospettiva, specialmente nell'ambito di questo progetto sperimentale dove l'IAQ e la valutazione dei sistemi di ventilazione rivestono un ruolo di primaria importanza.

In conclusione, sebbene i risultati finali del modello siano stati più che soddisfacenti, c'è il potenziale per ulteriori perfezionamenti affrontando gli aspetti sopracitati.

Per quanto riguarda il quarto punto della sperimentazione, ossia l'analisi del tetto verde, non è stato affrontato in quanto attualmente non è ancora cresciuta la vegetazione che dovrebbe costituire il punto di forza. In futuro, verranno monitorati due tetti, uno verde e l'altro a terrazza, entrambi collocati su alloggi con identiche caratteristiche costruttive, per effettuare un confronto dal punto di vista del comportamento termico della tecnologia del tetto verde. Sulla base delle misure verrà effettuato un confronto tra i dati sperimentali e quelli derivanti da simulazione mediante modelli di calcolo, che consentiranno di generalizzare i risultati ottenuti. Scopo della ricerca è la valutazione della capacità delle coperture a verde di modificare il bilancio termico della copertura e dei vani inferiori in funzione delle variazioni delle condizioni climatiche. Le misurazioni verranno svolte in continuo e prenderanno in esame entrambe le tipologie di copertura e si misurerà la temperatura a differenti livelli:

- In corrispondenza della superficie e ad un metro d'altezza;
- A livello dello strato di tenuta;
- Nell'ambiente interno sottostante in corrispondenza al soffitto;
- Rilevamento dei dati climatici (piovosità, temperature e vento).

I dati e i confronti elaborati dovranno fornire, a breve termine, informazioni riguardo alle prestazioni reali delle soluzioni progettuali adottate. A medio e lungo termine i risultati potranno essere utilizzati per impostare implementare tale tecnologia nel modello già realizzato e calibrato durante questo lavoro di tesi.

Bibliografia

- [1] Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. (2017). *Testo integrale del Documento di indirizzo per la realizzazione del Piano nazionale per l'inclusione scolastica degli alunni con disabilità (2017)*. <https://www.mimit.gov.it/images/stories/documenti/Testo-integrale-SEN-2017.pdf>
- [2] OIPE – Osservatorio Italiano sulla Povertà Energetica, “La povertà energetica in Italia”
- [3] European Fuel Poverty and Energy Efficiency (EPEE), 2006. Diagnosis of causes and consequences of fuel poverty in Belgium, France, Italy, Spain and United Kingdom EPEE project EIE/06/158/SI2.447367..
- [4] Phimister E, Vera-Toscano E, Roberts D. 2015, The Dynamics of Energy Poverty: Evidence from Spain. *Economics of Energy & Environmental Policy* 4; 153-166.
- [5] Ballesteros-Arjona, V., Oliveras, L., Muñoz, J. J. L., De Labry Lima, A. O., Carrere, J., Ruiz, E. M., Peralta, A., León, A. C., Rodríguez, I. M., Daponte-Codina, A., & Mari-Dell’Olmo, M. (2022). What are the effects of energy poverty and interventions to ameliorate it on people’s health and well-being?: A scoping review with an equity lens. *Energy Research & Social Science*, 87, 102456. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102456>
- [6] Somerville, M., Mackenzie, I., Owen, P. J., & Miles, D. P. B. (2000). Housing and health. *Public Health*, 114(6), 434–439. <https://doi.org/10.1038/sj.ph.1900687>
- [7] Engineers, A. S. O. H. R. a. A. (1974). *Thermal environmental conditions for human occupancy*.
- [8] Fanger, P. (1972). Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering,. <https://www.semanticscholar.org/paper/Thermal-comfort%3A-analysis-and-applications-in-Fanger/6c992f9b47a56b7f9590d1c6630184cfde0d5831>.
- [9] *ISO 7730:2005*. (n.d.). ISO. <https://www.iso.org/standard/39155.html>
- [10] Energy performance of buildings directive. (n.d.). Energy. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- [11] EPA. Indoor Air Pollution and Health. Report Series No. 104. 2013. Available online: <https://www.epa.ie/pubs/reports/research/health/IndoorAirPollutionandHealth.pdf> (accessed on 23 March 2020)
- [11] Qiu, Y., Yang, F., & Lai, W. (2019). The impact of indoor air pollution on health outcomes and cognitive abilities: empirical evidence from China. *Population and Environment*, 40, 388-410. <https://doi.org/10.1007/S11111-019-00317-6>.
- [13] X. Xie, Y. Li, A. T. Y. Chwang, P. L. Ho, and W. H. Seto, “How far droplets can move in indoor environments - revisiting the Wells evaporation-falling curve,” *Indoor Air*, vol. 17, no. 3, pp. 211–225, 2007, doi: 10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x.
- [12] He, Y., Liu, M., Kvan, T., & Peng, S. (2017). An enthalpy-based energy savings estimation method targeting thermal comfort level in naturally ventilated buildings in hot-humid summer zones. *Applied Energy*, 187,

- 717–31.
- [13] Sundell J. On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*. 2004;14 Suppl 7:51-8. doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x. PMID: 15330772.
- [14] European Standards. (n.d.). BS EN 16798-1:2019 Energy performance of buildings. Ventilation for buildings Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Module M1-6. ventilated buildings in hot-humid summer zones. *Applied Energy*, 187, 717–31.
- [15] Khedari, J., Rachapradit, N., & Hirunlabh, J. (2003). Field study of performance of solar chimney with air-conditioned building. *Energy*, 28(11), 1099–1114. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(03\)00092-6](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(03)00092-6)
- [16] Gil-Báez, M., Lizana, J., Villanueva, J. a. B., Molina-Huelva, M., Serrano-Jiménez, A., & Chacartegui, R. (2021). Natural ventilation in classrooms for healthy schools in the COVID era in Mediterranean climate. *Building and Environment*, 206, 108345. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108345>
- [17] Villar-Ramos, M. M., Macías-Melo, E., Aguilar-Castro, K., Hernández-Pérez, I., Arce, J., Serrano-Arellano, J., Díaz-Hernández, H., & López-Manrique, L. M. (2020). Parametric analysis of the thermal behavior of a single-channel solar chimney. *Solar Energy*, 209, 602–617. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.072>
- [18] Thateenaranon, P., Amornkitbamrung, M., Hirunlabh, J., Khedari, J., & Waewsak, J. (2017). Full-scale field investigation of a bio-climatic house under Thailand tropical climate. *Building and Environment*, 126, 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.027>
- [19] Park JS, Jee NY, Jeong JW. Effects of types of ventilation system on indoor particle concentrations in residential buildings. *Indoor Air*. 2014 Dec;24(6):629-38. doi: 10.1111/ina.12117. Epub 2014 May 14. PMID: 24750197. [23]G. Buonanno, L. Morawska, and L. Stabile, “Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications,” *Environ. Int.*, vol. 145, no. September, p. 106112, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106112.
- [20] Grigoropoulos, Evangelos & Anastaselos, Dimitrios & Nižetić, Sandro & Papadopoulos, Agis. (2016). Effective ventilation strategies for net zero-energy buildings in Mediterranean climates. *International Journal of Ventilation*. 14. 1-17. 10.1080/14733315.2016.1203607. [25] G. N. Sze To and C. Y. H. Chao, “Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases,” *Indoor Air*, vol. 20, no. 1, pp. 2–16, 2010, doi: 10.1111/j.1600-0668.2009.00621.x.
- [21] Maas, S., Da Cruz Antunes, J., & Steffgen, G. (2019). Energy efficiency and indoor air quality of seminar rooms in older buildings with and without mechanical ventilation. *Bauphysik*, 41(5), 243–251. <https://doi.org/10.1002/bapi.201900018>
- [22] Lai, D., Qi, Y., Liu, J., Dai, X., Zhao, L., & Wei, S. (2018). Ventilation behavior in residential buildings with mechanical ventilation systems across different climate zones in China. *Building and Environment*, 143, 679–690.

- <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.006> [28] S. N. Rudnick and D. K. Milton, "Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration," *Indoor Air*, vol. 13, no. 3, pp. 237–245, 2003, doi: 10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x.
- [23] Chen, X., Huang, P., Zhou, Z., & Gao, C. (2015). A review of green roof performance towards management of roof runoff. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/283025767_A_review_of_green_roof_performance_towards_management_of_roof_runoff
- [24] Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Haw, L. C., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., & Sulaiman, M. A. (2013). A review of energy aspects of green roofs. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 23, 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>
- [25] Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7), 719–729. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(01\)00062-7](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(01)00062-7)
- [26] Wong, J., & Lau, L. S. (2013). From the 'urban heat island' to the 'green island'? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong. *Habitat International*, 39, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2012.10.005>
- [27] Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & Ghaffarianhoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- [28] Stato, I. P. E. Z. D. (n.d.). *DECRETO LEGISLATIVO 3 marzo 2011, n. 28 - Normattiva*. <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2011;28>
- [29] Panasonic. (n.d.-a). *Manuale di progettazione ed installazione AQUAREA 2018*. https://www.aircon.panasonic.eu/IT_it/
- [30] CTI – Comitato termotecnico italiano. (s.d.). *UNI EN 1264-4:2021 "Sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento e il raffrescamento integrati nelle strutture – Parte 4: Installazione (UNI EN 1264-4)*.
- [31] *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden: Max von Pettenkofer: Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive*. (1858). Internet Archive. https://archive.org/details/bub_gb_3aFLAAAacAAJ/page/n1/mode/2up
- [31] World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>
- [32] *Gazzetta Ufficiale*. (1993, October 14). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1993/10/14/093G0451/sg>
- [33] Arundel, A., Sterling, E., Biggin, J. H., & Sterling, T. D. (1986). Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental Health Perspectives*, 65, 351–361. <https://doi.org/10.1289/ehp.8665351> *Gazzetta Ufficiale*. (1993, October 14). <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1993/10/14/093G0451/sg>
- [34] *ARERA - Analisi dei consumi dei clienti domestici*. (n.d.). https://www.arera.it/it/dati/mr/mr_consumiele.htm
- [35] S.A. Klein, W.A. Beckman, J.W. Mitchell, et al., *Trnsys 17* (2009) 1–29, 5
- [36] *Home*. (n.d.). Agenzia Regionale per La Prevenzione E Protezione

- Ambientale Del Veneto. <https://www.arpa.veneto.it/>. *Dati meteorologici orari*. (n.d.). <https://www.ambienteveneto.it/datorari/>
- [38] ASHRAE Handbook: Heating, ventilating, and air-conditioning applications. (2003)
- [39] *Manuale d'ausilio alla progettazione termotecnica. Miniguia AICARR.* (2010)
- [40] Smith, S., & Smith, S. (2021, February 23). Power Consumption chart of household appliances in a table. *Power Stuffs*. <https://powerstuffs.com/power-consumption-of-household-appliances/>
- [37] Allard, Y., Kummert, M., Bernier, M., & Moreau, A. (2011). Intermodel comparison and experimental validation of electrical water heater models in TRNSYS.
- [38] Di Unificazione, E. N. I. (2008). *UNI/TS 11300-2: *Prestazioni energetiche degli edifici : parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.*
- [39] FUENTES, E., WADDICOR, D. A. and SALOM, J. Improvements in the characterization of the efficiency degradation of water-to-water heat pumps under cyclic conditions. *Applied Energy* [online]. 2016. Vol. 179, p. 778–789. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.07.047. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.047>
- [40] Institution, B. B. S. (2018). *BS EN 14825:2018 : Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling : Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance.*
- [41] [Hensen, J. L. M (1995) *Modeling coupled heat and airflow: Ping-pong vs onions*
- [42] Polidoro, W. S. D. B. (2023). *CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.4 | NIST. NIST.* <https://www.nist.gov/publications/contam-user-guide-and-program-documentation-version-34>
- [43] Gross, D. (2023). A review of measurements, calculations and specifications of air leakage through interior door assemblies: | NIST. *NIST.* <https://www.nist.gov/publications/review-measurements-calculations-and-specifications-air-leakage-through-interior-door>
- [44] *Suitability of ASHRAE Guideline 14 metrics for calibration.* (2016).
- [45] Ahmad, M., & Culp, C. (2006). Uncalibrated building Energy simulation modeling results. *Science and Technology for the Built Environment*, 12(4), 1141–1155. <https://doi.org/10.1080/10789669.2006.10391455>
- [46] Evola, G., Gagliano, A., Marletta, L., & Nocera, F. (2017). Controlled mechanical ventilation systems in residential buildings: Primary energy balances and financial issues. *Journal of Building Engineering*, 11, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.04.010>
- [47] MANUALE OPERATIVO PIATTAFORMA IOT LOGBOT. (n.d.). Available at: https://logbot.cloud/wp-content/uploads/2023/dwn/Logbot_Manuale_v3.pdf [Accessed 20 Oct. 2023].

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. M. De Carli per l'opportunità concessami con questo lavoro di tesi. Un ringraziamento importante a Giacomo per questi mesi di supporto e guida fatti di incontri settimanali e, soprattutto, per gli ultimi giorni intensi.

Un ringraziamento anche a Sara, che in un momento di grande difficoltà, si è unita al lavoro di ricerca fornendo un contributo importantissimo.

Un sentito ringraziamento va a tutta la mia famiglia per il loro incoraggiamento costante durante questi intensi anni di università. Ringrazio profondamente mia madre, la quale è stata la mia supporter numero uno, costantemente in ansia per i miei esami e che mi ha sempre fatto sentire il suo supporto durante questi anni. Alle mattine prima di un esame e ai messaggi post-esame che mi mandava. Un ringraziamento speciale a mio fratello, per il suo supporto silenzioso senza mai incalzarmi di domande e per tutte le volte che mi portava fuori di casa perché troppo concentrato con lo studio in sessione. È una continua fonte di ispirazione vedere dove sei arrivato.

Un ringraziamento speciale ai miei amici, Gianluca e Saverio, grazie ai quali questi anni di università sono stati più leggeri, scanditi da colazioni interminabili all'insegna del calcio che conta, ai simposi in pausa pranzo che duravano un'eternità, alle pause studio interminabili in DIM e a tutto quello che abbiamo combinato in questi anni e meglio non raccontare. Ma soprattutto agli aperitivi importanti e ai mercoledì universitari. Per fortuna non abbiamo mai preso casa a Padova.

Un ringraziamento ad Alessandro, senza il quale non avrei mai intrapreso questo percorso e ora non sarei qua. Mi ha sempre motivato, riconoscendo il mio valore e potenziale anche dopo 5 anni di superiori di impegno nullo. È stato il mio mentore, nonché il modello di riferimento per puntare sempre all'eccellenza, forse a volte ossessivamente.

Infine, il ringraziamento più importante, quello a me. Per la tenacia, determinazione dimostrata in questi anni e per l'impegno profuso, a volte eccessivo.

Si chiude il sipario su un percorso lungo e intenso che ricorderò con grande nostalgia e si apre un nuovo capitolo della mia vita

