



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

***Automazione dei sistemi HVAC sulla base dei dati: uno studio sperimentale in un'aula universitaria.***

*Data-drive automation of HVAC Systems: an experimental study in a university study room.*

***Relatrice:***

*Prof.ssa Francesca Stazi*

***Laureanda:***

*Velia Topo*

***Correlatori:***

*Prof.re Costanzo Di Perna*

*Ing. Serena Summa*

*A.A. 2023/2024*

# ***Indice***

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>1</b>
<b>1. <i>Introduzione</i>.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. <i>Motivazione della tesi</i>.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2. <i>Stato dell'arte</i> .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3. <i>Obiettivo della tesi</i>.....</b>	<b>13</b>
<b>2. <i>Il caso di studio</i>.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. <i>Test Room</i>.....</b>	<b>15</b>
<b>3. <i>Metodi di misura</i>.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. <i>Campagna di monitoraggio</i> .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2. <i>Descrizione della strumentazione</i>.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3. <i>Selezione del campione</i> .....</b>	<b>25</b>
<b>3.4. <i>Svolgimento della prova</i>.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5. <i>Valutazioni soggettive</i> .....</b>	<b>29</b>
<b>3.6. <i>Sistema di controllo</i>.....</b>	<b>30</b>
<b>4. <i>Risultati</i>.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1. <i>Risultati sperimentali</i>.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1.1. <i>Fase 1</i>.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1.2. <i>Fase 2</i>.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1.3. <i>Fase 3</i>.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2. <i>Incidenza della CO<sub>2</sub> e velocità dell'aria</i>.....</b>	<b>40</b>
<b>4.3. <i>Incidenza della temperatura operativa</i>.....</b>	<b>45</b>
<b>4.4. <i>Realizzazione del framework</i>.....</b>	<b>47</b>
<b>5. <i>Conclusioni</i>.....</b>	<b>52</b>
<b>6. <i>Bibliografia</i>.....</b>	<b>54</b>

## ***Indice delle figure***

<b>Figura 1.</b> Human - in the - loop .....	9
<b>Figura 2.</b> Rappresentazione 3D della Test Room .....	16
<b>Figura 3.</b> Disposizione interna della Test Room .....	17
<b>Figura 4.</b> Realizzazione dell'apertura finestra.....	18
<b>Figura 5.</b> Fasi della campagna sperimentale.....	19
<b>Figura 6.</b> Fan-coil e stufa.....	20
<b>Figura 7.</b> Centralina DRU 10.....	21
<b>Figura 8.</b> Sensori del sistema ComfortSense Dantec.....	22
<b>Figura 9.</b> Centralina ComfortSense - Dantec Dynamics .....	23
<b>Figura 10.</b> Pulsantiera per la votazione degli occupanti a monitor .....	28
<b>Figura 11.</b> Diagramma concettuale del principio di funzionamento del sistema di controllo automatico implementato .....	30

## ***Indice delle tabelle***

<b>Tabella 1.</b> Caratteristiche geometriche della Test Room.....	15
<b>Tabella 2.</b> Specifiche dei sensori del sistema ComfortSense Dantec .....	24
<b>Tabella 3.</b> Dettagli del campione utilizzato .....	25
<b>Tabella 4.</b> Modello ASHRAE55 .....	26
<b>Tabella 5.</b> Variazione della temperatura di set point .....	27

## ***Indice dei grafici***

<b>Grafico 1.</b> Valori giornalieri, mediati nel tempo di occupazione della stanza, della temperatura dell'aria esterna, della temperatura di esercizio e dell'andamento della CO <sub>2</sub> della fase 1 .....	34
<b>Grafico 2.</b> Conteggio giornaliero delle votazioni per innalzare o abbassare la temperatura in relazione alla volontà di incrementare i ricambi d'aria orari (fase 1).	35
<b>Grafico 3.</b> Valori giornalieri, mediati nel tempo di occupazione della stanza, della temperatura dell'aria esterna, della temperatura di esercizio e dell'andamento della CO <sub>2</sub> della fase 2 .....	36
<b>Grafico 4.</b> Conteggio giornaliero delle votazioni per innalzare o abbassare la temperatura in relazione alla volontà di incrementare i ricambi d'aria orari (fase 2).	37
<b>Grafico 5.</b> Valori giornalieri, mediati nel tempo di occupazione della stanza, della temperatura dell'aria esterna, della temperatura di esercizio e dell'andamento della CO <sub>2</sub> della fase 3 .....	38
<b>Grafico 6.</b> Conteggio giornaliero delle votazioni per innalzare o abbassare la temperatura in relazione alla volontà di incrementare i ricambi d'aria orari (fase 3).	39
<b>Grafico 7.</b> Valutazione della CO <sub>2</sub> in funzione della percezione del comfort da parte degli occupanti nella fase di riscaldamento .....	40
<b>Grafico 8.</b> Valutazione della CO <sub>2</sub> in funzione della percezione del comfort da parte degli occupanti nella fase di raffreddamento .....	40
<b>Grafico 9.</b> Interazione dell'utente con il sistema di ventilazione nel periodo di riscaldamento (fase 2) per aumentare i volumi orari di ricambio dell'aria (Vo) .....	41
<b>Grafico 10.</b> Valori medi di CO <sub>2</sub> in funzione della temperatura operativa e della velocità dell'aria (proporzionale al diametro del cerchio) per ogni categoria di percezione del comfort degli occupanti nella fase di riscaldamento .....	43
<b>Grafico 11.</b> Valori medi di CO <sub>2</sub> in funzione della temperatura operativa e della velocità dell'aria (proporzionale al diametro del cerchio) per ogni categoria di percezione del comfort degli occupanti nella fase di raffreddamento .....	43

<b>Grafico 12.</b> Modello di regressione che prevede la probabilità di osservare un aumento dei ricambi d'aria ( $m^3/h$ ) in funzione della concentrazione di $CO_2$ in una stanza aperta durante il riscaldamento.....	44
<b>Grafico 13.</b> Valutazione della temperatura operativa in funzione della percezione di comfort degli occupanti nella fase di riscaldamento .....	46
<b>Grafico 14.</b> Valutazione della temperatura operativa in funzione della percezione di comfort degli occupanti nella fase di raffreddamento .....	46
<b>Grafico 15.</b> Modello di regressione per la fase di raffreddamento .....	47
<b>Grafico 16.</b> Modello di regressione per la fase di riscaldamento .....	47
<b>Grafico 17.</b> Modello di regressione delle temperature totale.....	48
<b>Grafico 18.</b> Validazione del framework .....	50
<b>Grafico 19.</b> Valutazione del PMV in relazione alla TSV degli utenti con e senza il framework.....	50

## ABSTRACT

Il comfort termico è legato alla soddisfazione degli occupanti con l'ambiente circostante e deve essere considerato come uno dei principali indicatori di prestazioni edilizie.

Le sensazioni di comfort dell'essere umano sono funzione di due fattori: gli *aspetti oggettivi*, legati alla struttura edilizia e gli *aspetti soggettivi*, che riguardano le caratteristiche fisiologiche e psicologiche della persona.

Il raggiungimento dello stato di comfort per tutti gli individui di un determinato ambiente è molto compresso proprio per le molteplici caratteristiche da cui è influenzato.

Questo studio di tesi propone un framework per il controllo dei sistemi HVAC nelle sale studio universitarie che integra un modello basato sui dati capace di prevedere la probabilità di interazione degli utenti con i sistemi di condizionamento e ventilazione, basato su variabili come il voto di sensazione termica (TSV), la qualità dell'aria percepita (PAQ) e parametri microclimatici, tra cui la temperatura dell'aria e la temperatura operativa, la velocità dell'aria, l'umidità relativa e la CO<sub>2</sub>.

L'esperimento ha consentito ai partecipanti di svolgere le proprie attività di studio o lavoro senza la necessità di essere supervisionati. Ciò ha consentito agli occupanti di non essere condizionati psicologicamente e ha reso la loro esperienza e interazione con l'ambiente e i sistemi il più naturale possibile.

L'analisi dei dati sperimentali ha rilevato che la temperatura operativa è il fattore principale che influisce sulla percezione termica degli occupanti, mentre la qualità dell'aria percepita è legata non solo alla concentrazione di CO<sub>2</sub>, ma anche alla sensazione termica e alla velocità dell'aria.

Inoltre, dai dati sperimentali sono stati ottenuti tre modelli predittivi (riscaldamento, raffrescamento e IAQ), che stimano la probabilità di interazione dell'utente con il sistema, con valori di  $R^2$  compresi tra 0,85 e 0,94.

Il modello per la fase di riscaldamento è stato testato automatizzando il sistema di riscaldamento attraverso il framework sviluppato e confrontando le sensazioni termiche degli utenti prima e dopo l'automazione. L'adozione di questi modelli ha migliorato il comfort termico degli utenti, incrementandolo dal 39% all'82%, dimostrando così l'efficacia del sistema.

## ABSTRACT

Thermal comfort is linked to occupants' satisfaction with their surrounding environment and should be considered one of the primary indicators of building performance.

Human comfort sensations depend on two factors: *objective aspects* related to the building itself, and *subjective aspects* concerning the physiological and psychological characteristics of individuals.

Achieving a state of comfort for all individuals in each environment is quite challenging due to the numerous characteristics that influence it.

This thesis study proposes a framework for controlling HVAC systems in university study rooms that integrates a data-driven model capable of predicting the likelihood of user interaction with heating and ventilation systems. This model is based on variables such as thermal sensation votes (TSV), perceived air quality (PAQ), and microclimatic parameters, including air and operative temperature, air velocity, relative humidity, and CO<sub>2</sub> concentration.

The experiment allowed participants to engage in their usual study or work activities without the need for supervision. This approach minimized psychological conditioning and made their experience and interaction with the environment and systems as natural as possible.

Data analysis revealed that operative temperature is the primary factor influencing occupants' thermal perception, while perceived air quality is related not only to CO<sub>2</sub> concentration but also to thermal sensation and air velocity.

Additionally, three predictive models (heating, cooling, and indoor air quality) were developed, estimating the likelihood of user interaction with the system, with R<sup>2</sup> values ranging from 0,85 to 0,94.

The heating phase model was tested by automating the heating system through the developed framework and comparing users' thermal sensations before and after automation. The adoption of these models improved users' thermal comfort, increasing it from 39% to 82%, thereby demonstrating the effectiveness of the system.

## 1. Introduzione

Considerando che le persone trascorrono oltre l'80% del loro tempo in ambienti chiusi, è essenziale garantire la qualità ambientale interna (IEQ) per la salute, la produttività e la percezione dello spazio degli utenti [27]. Ciò è fondamentale anche per limitare eventuali comportamenti che potrebbero portare a un uso eccessivo di energia per ristabilire un ambiente confortevole e neutro [28,29,30].

Nonostante gli edifici siano progettati per ottimizzare il consumo energetico, numerosi studi hanno dimostrato che gli spazi non soddisfano pienamente le aspettative degli occupanti in termini di comfort [31,32,33]. Infatti, il consumo energetico negli edifici è fortemente influenzato da diversi fattori che riguardano sia *aspetti interni*, come le proprietà fisico-tecniche dell'involucro, sia *aspetti esterni* come il clima e l'occupante.

Questo problema è particolarmente rilevante negli edifici nZEB, dove le azioni degli utenti influiscono in modo significativo sul consumo energetico [28]. Di conseguenza, comprendere a fondo il comportamento degli occupanti è essenziale per raggiungere le prestazioni energetiche desiderate [34,13].

Oltre ai parametri ambientali come temperatura, qualità dell'aria, illuminazione e acustica, le interazioni tra gli occupanti e l'edificio e tra occupanti e sistemi, dipendono anche da altri stimoli [35], quali fattori sociali, personali e contestuali [16], che provengono sia dall'ambiente che dai suoi abitanti [13].

Negli ultimi anni, la comunità scientifica ha iniziato a evidenziare l'importanza di considerare il comfort non in domini isolati, ma in maniera congiunta, analizzando come le loro diverse interazioni influenzano la percezione dell'ambiente da parte dell'occupante [16,36].

Risulta sempre più importante sviluppare un nuovo approccio alla progettazione considerando sempre più *l'individuo al centro della progettazione* in quanto è il soggetto che interagisce dinamicamente con l'ambiente che lo circonda, al quale è affidato il controllo di comfort localizzato e personalizzabile su di esso.

È necessario, dunque, attuare delle strategie di controllo incentrate sull'occupante, in modo da migliorare anche la gestione energetica degli edifici, infatti, si è pensato ad un sistema di miglioramento del comfort ambientale ottenuto da impulsi dinamici basati sull'occupante.

Con il nostro studio, abbiamo raccolto dati sulle sensazioni termiche di 52 studenti in un'aula universitaria reale, con un totale di 1270 voti raccolti durante le stagioni invernale ed estiva. Gli occupanti erano liberi di interagire con i sistemi HVAC senza supervisione, riducendo l'effetto Hawthorne [16].

La sperimentazione propone un framework per la gestione dei sistemi HVAC, basato su un modello predittivo che considera le interazioni tra utenti e sistemi, la sensazione termica (TSV), la qualità dell'aria percepita (PAQ) e i parametri microclimatici. La validazione sperimentale del framework ha dimostrato l'efficienza del modello nel prevedere e migliorare il comfort degli occupanti.

## *1.1. Motivazione della tesi*

Per comprendere cosa rende un ambiente termicamente confortevole per coloro che lo occupano, si sono effettuati degli studi concentrandosi sullo sviluppo di modelli empirici che possono rappresentare la percezione umana del comfort termico in termini di condizioni o fattori personali o ambientali.

Il modello che ha riscontrato maggiore accettazione, sviluppato utilizzando estesi esperimenti svolti in laboratorio su numerosi campioni di individui, è quello di Fanger, divenuto la base delle norme ISO 7730 e ASHRAE 55.

In particolare, Fanger ha studiato le condizioni termiche necessarie per raggiungere il livello di comfort inteso come il grado di benessere percepito dagli occupanti nello spazio considerato.

Il benessere è definito chiaramente come una caratteristica soggettiva, in quanto non tutti gli individui hanno la stessa sensazione dell'ambiente che lo circonda. Per questo motivo le condizioni di benessere assunte oggettivamente sono il frutto di una valutazione statistica effettuata su un gran numero di persone che ha permesso di ottenere delle curve del grado di soddisfazione dell'ambiente e dei parametri PMV (Predicted Medium Vote = Voto Medio Previsto) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied = Percentuale Prevista di Insoddisfatti).

Infatti, i suoi studi hanno portato all'individuazione dell'indice PMV espresso come la sensazione termica sulla scala delle sensazioni termiche soggettive corrispondenti a sette punti in condizioni ambientali uniformi per un certo gruppo di persone come citato nella ASHRAE.

Questo indice rappresenta il valore meglio del voto espresso da un certo numero di soggetti, basato su parametri ambientali, sull'attività svolta e quindi sul tasso metabolico e sull'isolamento dovuto alla tipologia di abbigliamento.

Le linee guida all'interno delle normative sono ampiamente usate dagli ingegneri per la progettazione dell'involucro edilizio e per gli impianti di climatizzazione, in quanto, permettono la previsione e la verifica della sensazione percepita dall'essere umano per effetto dell'azione combinata del clima esterno, dell'involucro edilizio, dell'impianto di climatizzazione e soprattutto del comportamento individuale.

Ad ogni modo, il voto medio previsto (PMV) va a considerare gli occupanti come dei contenitori che subiscono passivamente la gestione dell'edificio. Infatti, questa tipologia di modello si sviluppa sul concetto di previsione del comportamento di tipo standardizzato che non è ormai sufficiente e adeguato e comporta una serie di limitazioni.

In primo luogo, possiamo dire che il comportamento degli occupanti è estremamente variabile nel contesto quotidiano, infatti le azioni e le reazioni di ognuno di essi sono molto influenzate dall'ambiente circostante che a sua volta viene condizionato dalle interazioni del soggetto con esso.

Inoltre, è di fondamentale importanza tenere conto delle variabili legate agli aspetti fisiologici, psicologici e sociali dell'occupante che possono far variare notevolmente le sue scelte e comportamenti.

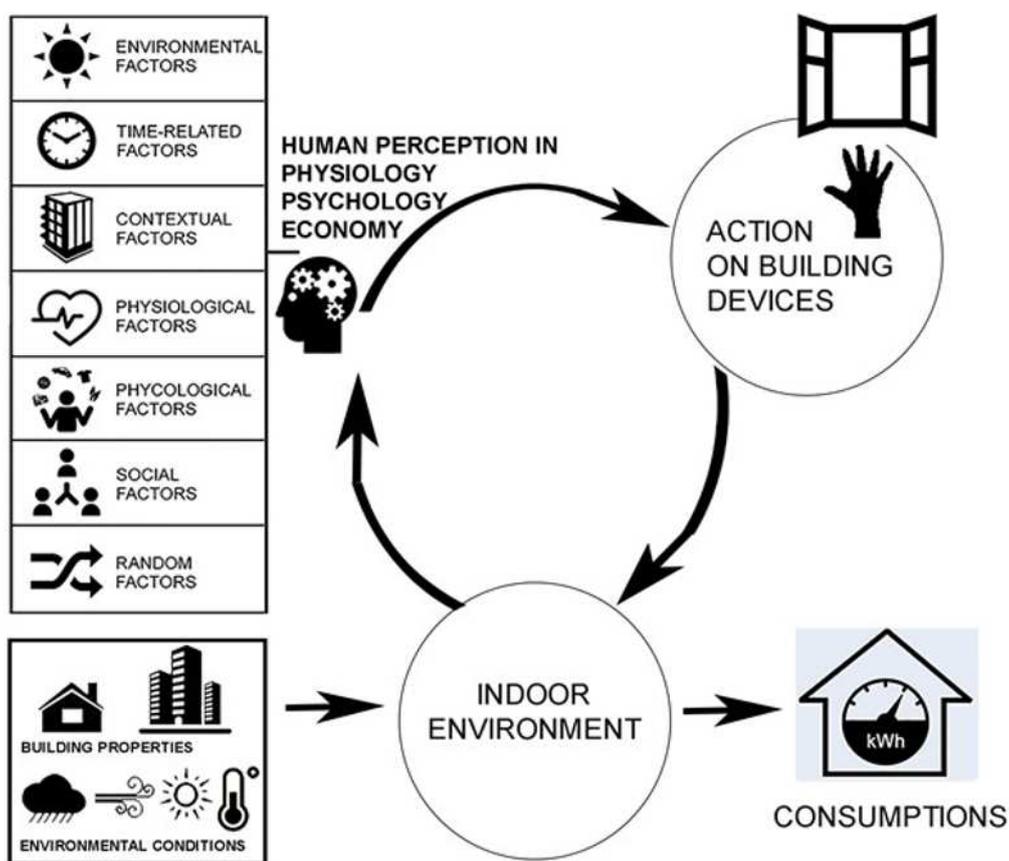
In secondo luogo, i dati raccolti in laboratorio successivamente agli studi effettuati per l'acquisizione dei modelli empirici, sono valutati in condizioni statiche fisse che non tengono conto dell'interazione dell'occupante con l'ambiente circostante e con il sistema.

In definitiva possiamo affermare che questa tipologia di modelli di previsione del comportamento degli occupanti basato su un ambiente di tipo statico e standardizzato, che fissano delle temperature di comfort generalizzato (20°C per il comfort invernale e 26°C per il comfort estivo) non soffiavano più le nuove esigenze.

Si stanno ricercando invece modelli che si basano su interazioni di tipo dinamico degli occupanti che prendono il nome di **modelli di comfort personalizzati**, i quali vedono al centro l'uomo e sono definiti come:

**“Human – in the – loop”**

*“L’occupante è inserito all’interno di un cerchio in cui le sue interazioni con i dispositivi dell’edificio sono incorporate all’interno di quelle che saranno le linee guida per sviluppare nuove tecniche di progettazione dell’edificio stesso.”*



**Figura 1. Human - in the - loop**

Human – in the – loop può essere implementato con l'utilizzo di modelli comportamentali empirici i quali permettono di individuare una correlazione tra l'eventualità che un'azione si verifichi e la volontà del singolo utente.

Questo permette agli utenti di poter controllare la gestione dell'ambiente e creare degli algoritmi comportamentali appropriati che controllano il funzionamento dell'edificio adattando le condizioni ambientali in base ai dati raccolti, al rilevamento automatizzato dell'occupante e alle preferenze termiche delle persone presenti nell'ambiente.

Nel corso degli anni, con l'esplosione di questa nuova tipologia di modelli incentrato sull'individuo, si sono svolte sempre più analisi e studi sperimentali proprio riguardo il comportamento degli occupanti al fine di individuare dei modelli personalizzati di comfort sempre più precisi.

Il seguente studio di tesi mira a restituire un modello sperimentale di tipo previsionale del comportamento degli occupanti che si basa sulla loro azione dinamica e sull'interazione con l'ambiente circostante.

## 1.2. *Stato dell'arte*

Le persone modificano l'ambiente sia con le loro azioni di adattamento, sia con la loro presenza, con un innegabile impatto sull'ambiente interno.

In questi ultimi anni, diversi studiosi si sono sempre più focalizzati sull'analisi sia di parametri ambientali ma soprattutto su parametri biologici legati all'individuo, considerato elemento focale per lo studio del comfort degli ambienti.

Lo studio del *comfort multi - dominio* è un'area di ricerca in espansione e in rapida crescita, ma ancora limitata.

Zhao et al [37], hanno evidenziato che i risultati attualmente disponibili sono spesso contraddittori, con modelli che considerano solo due domini, in particolare quello termico-visivo, oltre al fatto che gli studi si focalizzano su poche tipologie di edifici. Inoltre, affermano che l'insoddisfazione di un singolo dominio può influenzare la soddisfazione complessiva, evidenziando la complessità delle relazioni tra i diversi domini.

Torresin et al [38], hanno invece sottolineato come la maggior parte degli studi sia stata condotta in uffici o ambienti senza uno scopo specifico, con solo il 2% delle ricerche svolte in aule scolastiche.

Rajput et al [39], hanno confermato che negli ambienti educativi, il comfort termico e la qualità dell'aria interna (IAQ) influenzano direttamente la produttività, le capacità cognitive e l'attuazione degli studenti [30,40,41].

Le procedure sperimentali utilizzate per modellare il comfort multi-domino, spesso condotte in laboratorio o camere climatiche, presentano dei limiti, poiché i soggetti sono esposti a condizioni ambientali in sequenza a una o più condizioni ambientali intervallate o meno da un periodo di neutralizzazione [38], allontanandosi così dalle percezioni reali [42].

Hu et al [1], hanno criticato il fatto che la maggior parte degli studi definiscono gli intervalli di temperatura confortevoli solo sulla base della correlazione tra sensazione termica e temperatura interna, ignorando il desiderio effettivo delle persone di adattare l'ambiente alle proprie esigenze. Infatti, nel loro precedente studio sperimentale [2], hanno dimostrato che il bisogno termico realistico di un soggetto si riflette nel suo comportamento di utilizzo dell'aria condizionata.

Il comportamento degli utenti, dunque, è essenziale non solo per comprendere il comfort indoor, ma anche per ottimizzare l'efficienza energetica attraverso la gestione di sistemi HVAC [43,44,45].

Tuttavia, le tradizionali regolazioni manuali di questi sistemi spesso portano a un'inefficienza poiché gli utenti faticano a identificare le loro reali esigenze di comfort termico [46]. Allo stesso modo, i sistemi basati su regolazioni automatiche che misurano solo la temperatura in un punto fisso non considerano la variabilità del comfort umano dinamico [47].

Per risolvere questi problemi, i ricercatori hanno sviluppato vari approcci, come modelli basati sulle preferenze degli occupanti [48,49,50], l'uso di dispositivi indossabili per monitorare risposte fisiologiche e comportamentali [51,52,53], e modelli di apprendimento automatico (ML) [54,55,56,57].

Tuttavia, Bogatu et al [18] hanno evidenziato limiti di questi approcci, tra cui la necessità di un feedback costante degli occupanti e problemi di trasparenza nei modelli ML. Anche se questi modelli possono raggiungere una precisione del 90% [58], richiedono grandi quantità di dati, che spesso sono limitati a campioni di piccole dimensioni.

In sintesi, gran parte degli studi attuali si concentra su poche tipologie di edifici, in particolare uffici, con solo una minima parte condotta in aule [38]. Inoltre, i modelli basati sulle sensazioni termiche degli utenti sono perlopiù sviluppati in ambienti di laboratorio [18], allontanandosi dalle condizioni reali.

### ***1.3. Obiettivo della tesi***

I comportamenti delle persone hanno un'influenza innegabile sia sulle prestazioni degli edifici che sulla qualità dell'ambiente interno. Per prevedere le loro azioni e ottenere previsioni accurate è di primaria importanza la comprensione del loro processo decisionale.

Poiché le condizioni di comfort sono definite individualmente, le persone modificano l'ambiente in base alle proprie preferenze ed alle proprie esigenze personali. Questo significa che i comportamenti degli utenti non sono guidati da regole deterministiche ma i loro aggiustamenti variano a seconda degli stimoli individuali e contestuali.

Attualmente in letteratura si sta verificando il passaggio da modelli di tipo stazionario validi per gruppi di individui come quello di Fanger a modelli personalizzati incentrati sul singolo individuo e sulle sue caratteristiche fisiologiche e psicologiche.

Sono decisamente minori, invece, gli studi che cercano di collegare più parametri insieme, ma soprattutto difficilmente vanno a correlare l'azione che la persona fa su un dispositivo dell'edificio o su un impianto. Inoltre, sono ancora più rari gli studi sulla creazione di modelli sperimentali su cui improntare la gestione dell'impianto in maniera automatizzata, per il miglioramento del comfort dei soggetti presenti nell'ambiente interno.

Il nostro studio si propone di colmare queste lacune raccogliendo dati su sensazioni termiche degli studenti in un'aula universitaria, dove gli utenti possono interagire liberamente con i sistemi senza supervisione, permettendoci di creare modelli predittivi più realistici.

## 2. Il caso di studio

La sperimentazione è stata sviluppata attraverso le seguenti fasi:

- Raccolta dei dati sperimentali: comporta la registrazione dei parametri ambientali interni attraverso l'utilizzo di sensori microclimatici, la valutazione delle sensazioni termiche degli utenti (TSV) e le interazioni degli utenti con il sistema HVAC tramite un'interfaccia dedicata;
- Elaborazione numerica: consiste nell'organizzazione dei dati, la discretizzazione delle variabili continue e il calcolo delle probabilità per la definizione di modelli empirici preliminari riguardanti la probabilità di interazione degli occupanti con i sistemi HVAC;
- Sviluppo del framework di controllo automatizzato: riguarda l'identificazione di un algoritmo decisionale che rifletta le preferenze termiche degli utenti e guidi il funzionamento del sistema di condizionamento dell'aria in modo automatizzato utilizzando un approccio stocastico;
- Valutazione sperimentale dell'efficacia del framework: si riferisce al confronto del TSV degli utenti prima e dopo il controllo automatizzato del sistema HVAC.

Tali attività saranno descritte in dettaglio nei capitoli successivi.

## 2.1. Test Room

La sperimentazione è stata condotta in loco in una stanza situata all'interno dell'Università Politecnica delle Marche, ad Ancona, Italia. Il complesso è situato in un quartiere periferico della città con prevalente destinazione residenziale.

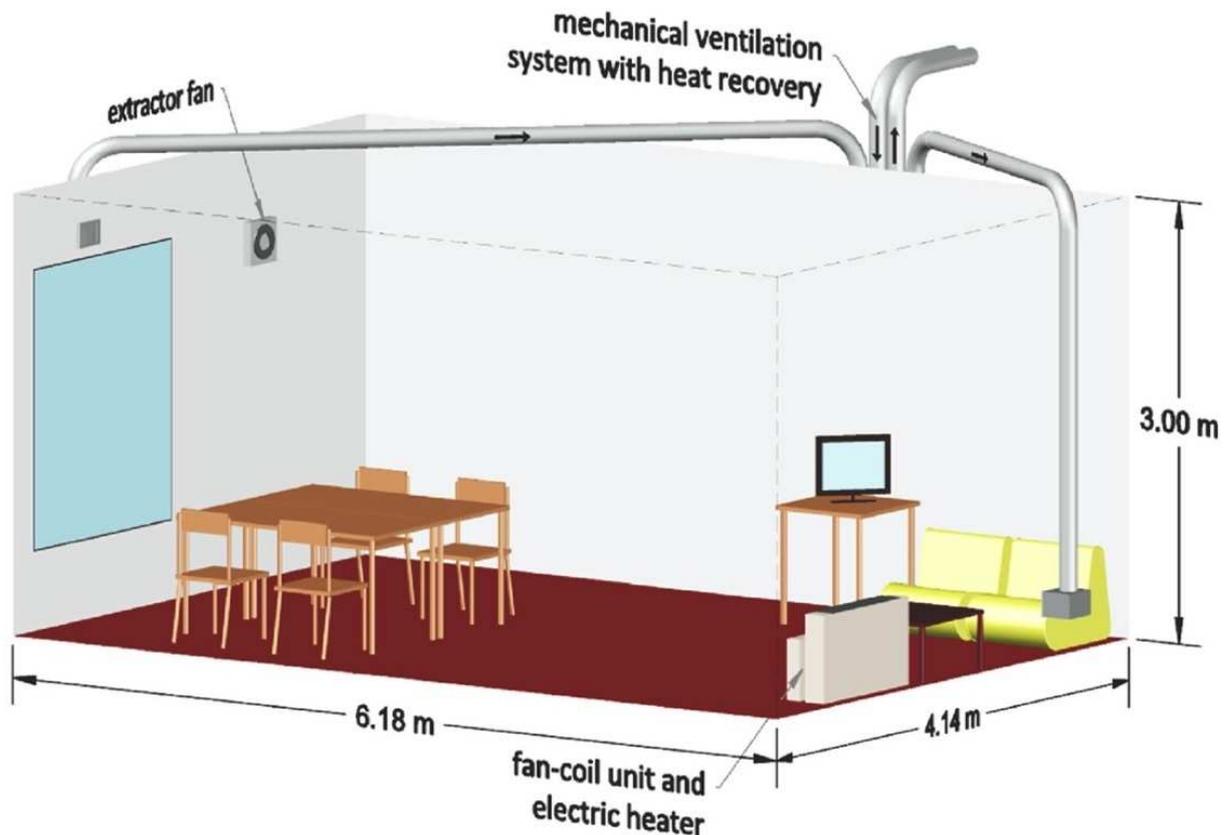
Le indagini si sono svolte esclusivamente nel “laboratorio di termotecnica” all'interno del *DIISM - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche - dell'Università*.

**Tabella 1.** Caratteristiche geometriche della Test Room

<b>Caratteristiche</b>	<b>Dimensione</b>
Pianta (m)	6,00 x 4,00
Superficie netta (m <sup>2</sup> )	24,00
Altezza netta (m <sup>2</sup> )	3,00
Volume interno (m <sup>3</sup> )	72,00
Rapporto S/V	0,33

La stanza in questione, come si evince nella *Tabella 1*, aveva dimensioni di 24 m<sup>2</sup> (6,18 m x 4,14 m) e un'altezza di 3,00 m con una finestra non apribile di 3,20 m<sup>2</sup> (2,00 m x 1,60 m), pari a 1/8 della superficie pavimentata. L'unico accesso alla stanza è possibile tramite una porta ricavata all'interno di uno dei pannelli laterali posto sul lato lungo della stanza.

La struttura è stata realizzata con l'assemblaggio di profili in acciaio su cui sono stati montati dei pannelli di legno coibentato MDF (Medium Density Fireboard) da 5 mm di spessore, sigillati con nastri speciali per garantirne una perfetta chiusura.



*Figura 2. Rappresentazione 3D della Test Room*

Nella stanza si è voluto ricreare l'ambiente interno di un'abitazione riproducendo un Open Space cucina – soggiorno. Lo spazio si presenta a primo impatto come ampio e luminoso. Possiamo immaginare idealmente che la stanza sia divisa in due sezioni. Da un lato è posizionata l'area cucina, mentre dall'altro un piccolo soggiorno.

In particolare, accanto all'apertura della finestra è stato installato un piano cottura ad induzione ed una cappa fornita dall'azienda marchigiana ELICA, che ha collaborato allo sviluppo del progetto.

Proprio d'avanti all'apertura della finestra sono stati posizionati due tavolini, uno di fianco all'altro, con delle sedie dove poter far sistemare i partecipanti alla sperimentazione consentendo loro di poter svolgere le attività di studio e/o lavoro comodamente.

Dall'altra parte della stanza si è voluto ricreare un piccolo angolo soggiorno con alcuni divanetti e un tavolino basso. Inoltre, nella parte centrale della camera, è posizionata una scrivania che ospita la postazione computer necessaria alla registrazione di tutti i dati che venivano, di volta in volta, acquisiti dai diversi sensori presenti nell'ambiente.



*Figura 3. Disposizione interna della Test Room*

I dati acquisiti dai sensori vengono poi inviati ad un software di automazione domestica chiamato DANTEC sul quale vengono visualizzati e salvati su un apposito database da cui è possibile successivamente estrarli ed analizzarli.

Inizialmente, la fonte di luce della stanza era solo di tipo artificiale, proveniente dalla copertura realizzata con teli trasparenti che permettevano l'accesso della luce dall'alto. La Normativa Nazionale (Decreto Ministeriale 5 luglio 1975) ha stabilito un "fattore medio di luce diurna" che deve essere non inferiore al 2% con l'obbligo di avere una superficie apribile non inferiore a 1/8 della superficie calpestabile.

Tutti questi fattori insieme determinano il rapporto aeroilluminante ovvero il rapporto tra la superficie del pavimento e quella della finestra, il quale permette di restituire due condizioni importanti all'ambiente: l'ingresso di luce naturale e un ricambio d'aria sufficiente all'interno dei locali.

Per rispondere a questa esigenza normativa si è ritenuto opportuno ricavare un'apertura in uno dei pannelli presenti sul lato corto della stanza in quanto era orientato verso la parete finestrata del dipartimento. Questo avrebbe permesso l'ingresso di luce naturale all'interno della Test Room.



*Figura 4. Realizzazione dell'apertura finestra*

### 3. Metodi di misura

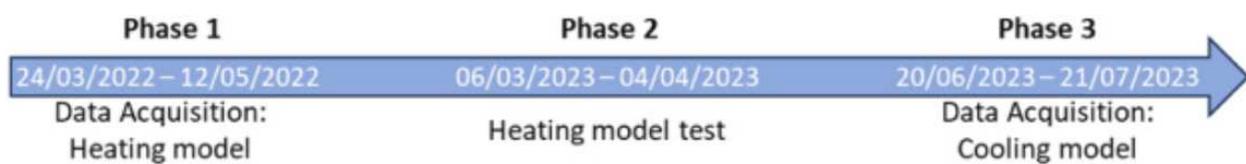
La seguente sperimentazione si basa su una categoria di studi chiamata case-study, cioè lo studio di un singolo ambiente che possa essere rappresentativo e indicativo in merito a differenti caratteristiche.

Nel seguente capitolo viene spiegata la metodologia applicata in ogni fase della suddetta sperimentazione. In particolare, ci si sofferma sulla campagna di monitoraggio ovvero sul periodo di svolgimento della sperimentazione, sulla composizione del campione di occupanti, sugli strumenti utilizzati e sulle metodologie di raccolta dei dati e dei questionari selezionati alla fine dell'esperienza all'interno della Test Room.

#### 3.1. Campagna di monitoraggio

La campagna di monitoraggio è stata condotta in tre fasi: nell'inverno 2022 (*fase 1*), nell'inverno 2023 (*fase 2*) e nell'estate 2023 (*fase 3*).

Il campione dei soggetti è variato nel corso delle tre fasi della sperimentazione.



*Figura 5. Fasi della campagna sperimentale*

Nel periodo di riscaldamento della *fase 1*, gli utenti potevano esprimere la loro sensazione termica e in base a questa variare il set-point della temperatura senza però avere il controllo delle portate del sistema di ventilazione.

Nel periodo di riscaldamento della *fase 2*, gli utenti potevano esprimere la loro sensazione termica senza variare il set-point della temperatura, poiché era controllato automaticamente dal framework sviluppato. Inoltre, i soggetti potevano variare liberamente i ricambi d'aria orari e quindi le portate del sistema di ventilazione per ristabilire il comfort in termini di qualità dell'aria.

Nel periodo di raffreddamento della *fase 3*, gli utenti, esprimendo le loro sensazioni termiche, potevano variare il set-point della temperatura e potevano cambiare le portate del sistema di ventilazione.

Più nello specifico possiamo affermare che la *fase 1* e la *fase 3*, rispettivamente per il periodo invernale ed estivo, è servito per l'acquisizione di dati che hanno permesso la realizzazione di un framework di controllo del sistema HVAC. Diversamente, la *fase 2* è stata piuttosto di verifica del framework realizzato durante la *fase 1*.

### **3.2. Descrizione della strumentazione**

La Test Room è dotata di un'unità fan-coil per il raffrescamento (potenza frigorifera: 1,50 kW, portata massica 200 m<sup>3</sup>/h) in estate, di una stufa elettrica (potenza termica: 1,20 kW) in inverno e di un sistema di ventilazione meccanica con recupero di calore, caratterizzato da una portata d'aria fissa di 130 m<sup>3</sup>/h.



**Figura 6.** Fan-coil e stufa

Dopo aver trascorso un periodo di tempo prolungato all'interno di un ambiente isolato in cui non sono presenti aperture verso l'esterno per consentire il ricambio d'aria, i valori di CO<sub>2</sub> si innalzano drasticamente raggiungendo i 1100 – 1200 ppm, valori soglia oltre i quali sarebbe necessario attivare dei meccanismi di ricambio d'aria automatizzati. Per questo motivo la stanza è stata dotata di un ventilatore di estrazione a tre velocità utilizzato per aumentare i ricambi d'aria orari in base alle esigenze degli utenti (Prima velocità: 230 m<sup>3</sup>/h; Seconda velocità: 330 m<sup>3</sup>/h; Terza velocità: 430 m<sup>3</sup>/h). L'impianto ha lo scopo di rinnovare l'aria all'interno della stanza utilizzando aria completamente esterna preriscaldata.



**Figura 7.** Centralina DRU 10

In particolare, l'impianto (*DRU 10*) è stato installato posizionando un sistema di condotti al di sopra della Test Room. L'aria viene movimentata tramite una doppia rete di condotti di distribuzione, ripartiti tra aria di rinnovo prelevata dall'esterno (in entrata) e aria di ripresa dai locali umidi (in uscita).

I due flussi d'aria vengono prima filtrati e poi inviati ad un recuperatore a flussi incrociati, nel quale, attraverso delle pareti metalliche con ottima conducibilità termica, l'aria in uscita cede una parte del suo calore (o ne estrae una parte) all'aria di rinnovo esterna. Successivamente, viene reimpressa nell'ambiente con temperatura e umidità controllata.

Il sistema di monitoraggio dei dati ambientali interni è stato installato secondo la norma ISO7726:2001 [26], usando una stazione microclimatica standard indoor (*ComfortSense – Dantec Dynamics*), posta al centro della stanza e dotata di tre anemometri a sfera calda per la misura della temperatura dell'ambiente ( $T_a$ ) e della velocità dell'aria interna ( $v_a$ ), una sonda per l'umidità relativa (RH) e un sensore di forma ellissoidale per la misura della temperatura operativa ( $T_{op}$ ).

Nel dettaglio, i sensori che fanno parte del sistema *ComfortSense Dante*, sono in grado di simulare i fattori angolari di una persona in piedi o seduta, in funzione dell'inclinazione della sonda stessa, infatti, se la sua posizione è verticale corrisponde ad una persona in piedi, se la posizione è orizzontale corrisponde una persona sdraiata, mentre nel nostro caso, è stata posizionata con un'angolazione di  $30^\circ$  che corrisponde proprio alla posizione di una persona seduta.



**Figura 8.** Sensori del sistema *ComfortSense Dante*

La strumentazione descritta ci permette di ottenere una misura diretta della temperatura media radiante che combinata con la temperatura dell'aria ci fornisce la temperatura operativa che tiene conto delle diverse temperature degli oggetti irraggianti sull'individuo.



*Figura 9. Centralina ComfortSense - Dantec Dynamics*

Questo sistema è progettato per la ricerca e lo sviluppo di sistemi di riscaldamento e condizionamento che richiedono misurazioni in più punti della velocità e della temperatura dell'aria. Infatti, è dotato di sensori omnidirezionali con una risposta in frequenza di 2 Hz per ottenere misurazioni del tiraggio.

Inoltre, è un sistema progettato per ricercare un comfort termico in cui sono richieste misure accurate e di alta qualità per caratterizzare l'ambiente termico all'interno degli edifici.

In particolare, per valutare la qualità dell'aria indoor è stato utilizzato il sensore *LSI LASTEM CO<sub>2</sub> BS01031*. Tutti i dati ambientali sono stati acquisiti a intervalli regolari di 1 minuto.

*Tabella 2. Specifiche dei sensori del sistema ComfortSense Dantec*

<i>Parametro</i>	<i>Sensore</i>	<i>Misurazione delle altezze</i>
Temperatura dell'aria interna (°C)	Termoanemometro	0,1 m – 0,6 m – 1,1 m
UR dell'aria interna (%)	Igrometro	1,5 m
Velocità dell'aria interna (m/s)	Termoanemometro	0,1 m – 0,6 m – 1,1 m
Temperatura operativa interna (°C)	Termometro a globo	0,6 m
CO <sub>2</sub> (ppm)	Cella elettrochimica	1,8 m

### 3.3. Selezione del campione

Il campione di soggetti coinvolto nella sperimentazione è misto ed include un numero di 52 soggetti diversi per un totale di 474 voti nell'inverno 2022 (*fase 1*), 304 voti nell'inverno 2023 (*fase 2*) e 659 voti nell'estate 2023 (*fase 3*) per un totale di 212 ore di campionamento.

Il segmento di popolazione intervistato aveva un'età compresa tra i 21 e i 40 anni.

*Tabella 3. Dettagli del campione utilizzato*

<i>Stagione</i>	<i>Fase</i>	<i>Genere</i>	<i>Numero</i> <i>(-)</i>	<i>Peso</i> <i>(kg)</i>	<i>Altezza</i> <i>(cm)</i>	<i>Abbigliamento</i> <i>(clo)</i>
Inverno 2022	1	Uomo	8	70 - 115	165 - 200	0,5 – 0,9
		Donna	10	55 - 75	150 - 180	0,5 – 1,0
Inverno 2023	2	Uomo	5	60 – 85	160 – 185	0,5 – 0,9
		Donna	9	50 – 80	160 - 165	0,5 – 1,0
Estate 2023	3	Uomo	10	65 – 85	165 – 185	0,2 – 0,4
		Donna	10	50 - 70	160 - 175	0,3 – 0,5

I soggetti partecipanti sono stati suddivisi in gruppi da massimo quattro persone ogni giorno nel corso della sperimentazione. Ogni soggetto ha trascorso un minimo di tre e un massimo di otto ore all'interno della stanza ogni giorno, durante le quali era libera di svolgere attività d'ufficio come lavorare o studiare. Ciò è stato effettuato per superare le limitazioni della letteratura descritte riguardo l'effetto Hawthorne [16].

### 3.4. Svolgimento della prova

Come detto precedentemente, la sperimentazione è stata condotta in diversi periodi. In particolare, la *fase 1* è stata oggetto di un lavoro di tesi precedente mentre la *fase 2* e la *fase 3* sono oggetto della suddetta tesi.

In tutte e tre le fasi, prima dell'inizio della prova, è stato chiesto ad ogni soggetto un periodo di trenta minuti di acclimatamento per limitare l'influenza dell'ambiente e/o dell'attività precedente all'ingresso nella Test Room. Le persone occupavano simultaneamente la stanza e fornivano un feedback sulla percezione personale esprimendo la loro sensazione termica sul modello ASHRAE55 a sette punti [25].

*Tabella 4. Modello ASHRAE55*

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Molto freddo	Freddo	Leggermente freddo	Neutro	Leggermente caldo	Caldo	Molto caldo

Infatti, ogni dieci minuti, un promemoria audio indicava ai soggetti quando votare rispondendo ad un'unica domanda:

***“Qual è la tua sensazione termica complessiva?”***

Attraverso l'uso di un mouse wireless fornito sui tavoli, gli utenti potevano votare tramite un pannello di pulsanti virtuali impostato sul monitor installato nella sala studio. In particolare, nella *fase 1* e nella *fase 3*, sulla base delle valutazioni degli utenti, il sistema calcolava il voto medio e variava automaticamente la temperatura di set point rispettivamente nelle condizioni evidenziate nella *Tabella 5*.

*Tabella 5. Variazione della temperatura di set point*

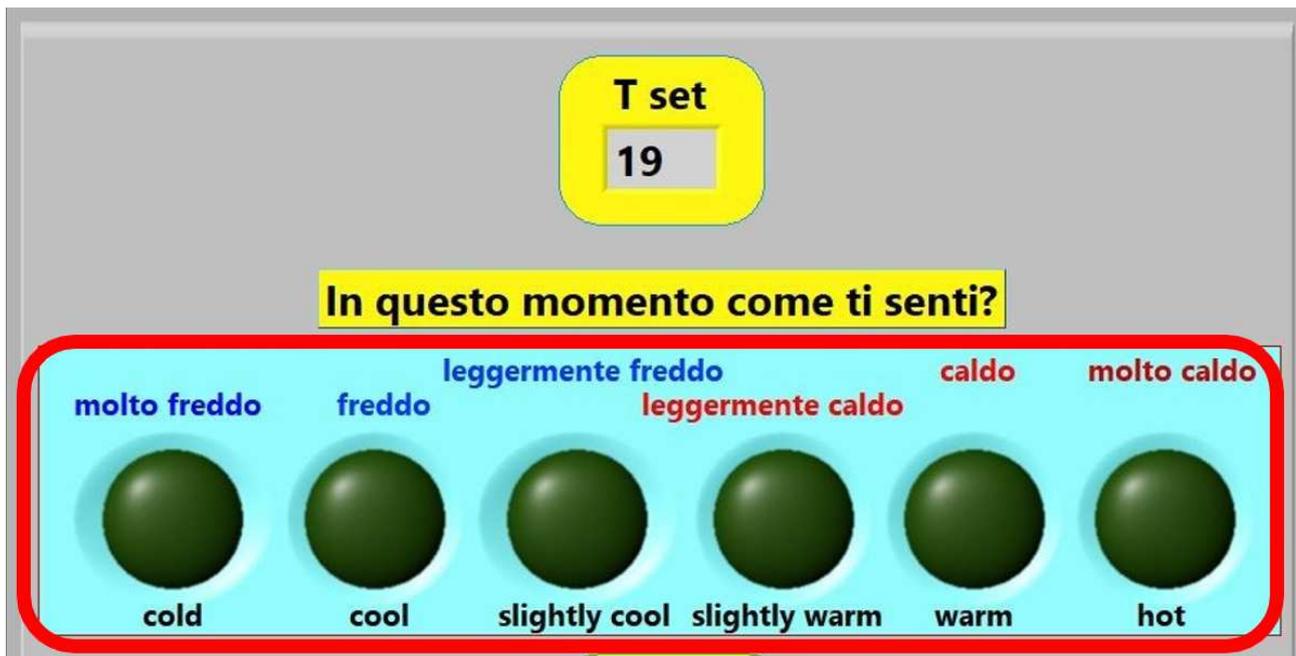
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Molto freddo	Freddo	Leggermente freddo	Neutro	Leggermente caldo	Caldo	Molto caldo
+ 1,5 °C	+ 1,0 °C	+ 0,5 °C	+ 0,0 °C	- 0,5 °C	- 1,0 °C	- 1,5 °C

È stata considerata una banda morta di 0,5°C attorno alla temperatura di riferimento per non causare instabilità nel sistema. Se la preferenza di temperatura era “neutra”, gli occupanti erano considerato a loro agio. In caso contrario (ad esempio “più caldo” o “più freddo”), venivano considerati a disagio.

Poiché è più probabile che gli occupanti segnalino il loro stato di disagio, è stato assunto che se non venivano ricevuti segnali dalle loro votazioni, questi venivano considerati a loro agio in quel momento o avevano raggiunto lo stato di comfort da soli, eseguendo un comportamento adattivo, come indossare il maglione o togliere il giubbotto.

Per quanto riguarda la *fase 2* e la *fase 3*, gli utenti avevano il potere di variare i m<sup>3</sup>/h di ricambio d’aria all’interno della stanza a loro discrezione, modificando le velocità del sistema attraverso un pulsante automatico collegato a una ventola di estrazione a tre velocità, in caso di bassa qualità dell’aria percepita (PAQ). Anche questa informazione veniva registrata dal sistema di controllo installato nell’aula.

Nella *fase 1* la Test Room aveva una temperatura iniziale di set point impostata a 19°C che, di volta in volta, veniva modificata o meno in base alla votazione media degli occupanti. La temperatura di set point agisce sulla temperatura operativa registrata con la centralina Dantec, dunque, ogni modifica dovuta alla votazione mira ad innalzare o abbassare la temperatura operativa.



*Figura 10. Pulsantiera per la votazione degli occupanti a monitor*

Se il gradiente tra le due temperature supera i  $0,25^{\circ}\text{C}$ , allora si attivano rispettivamente la stufa elettrica nel caso in cui la temperatura operativa sia inferiore alla temperatura di set point, o un'unità fan-coil nel caso contrario in cui la temperatura operativa superi la temperatura di set point.

Lo stesso procedimento accadeva nella *fase 3*, con però una temperatura iniziale di set point di  $25^{\circ}\text{C}$  la quale, anche in questo caso, variava in base alla votazione media degli occupanti.

### 3.5. *Valutazioni soggettive*

Gli utenti presenti all'interno di un ambiente, se sottoposti alle stesse condizioni ambientali, possono comportarsi in modo molto diverso. Questo può accadere a causa delle proprie preferenze personali e delle abitudini che possono incidere sulla loro reattività in risposta ad una differente sensazione termica.

Per questo motivo si è ricorso all'uso di una *valutazione soggettiva* dello stato di comfort degli occupanti. A tale scopo è stato chiesto loro di compilare un questionario alla fine del tempo trascorso all'interno della Test Room per ottenere delle informazioni soggettive riguardo l'esperienza e soprattutto per poterle confrontare con le votazioni accumulate.

In particolare, il questionario da compilare può essere considerato come suddiviso in due sezioni:

- Nella prima sezione venivano richieste delle informazioni generiche per quanto riguarda le caratteristiche fisiche e biologiche del soggetto (genere, età, peso, altezza e abbigliamento);
- Nella seconda sezione venivano richieste informazioni riguardo la percezione personale della Test Room dal punto di vista generale ma anche nello specifico dal punto di vista termico, acustico, visivo e della qualità dell'aria.

Questa parte relativa alle valutazioni soggettive è stata incorporata con i dati rilasciati dal sistema Dantec, dunque, anch'esse sono state un riscontro importante per l'elaborazione del framework.

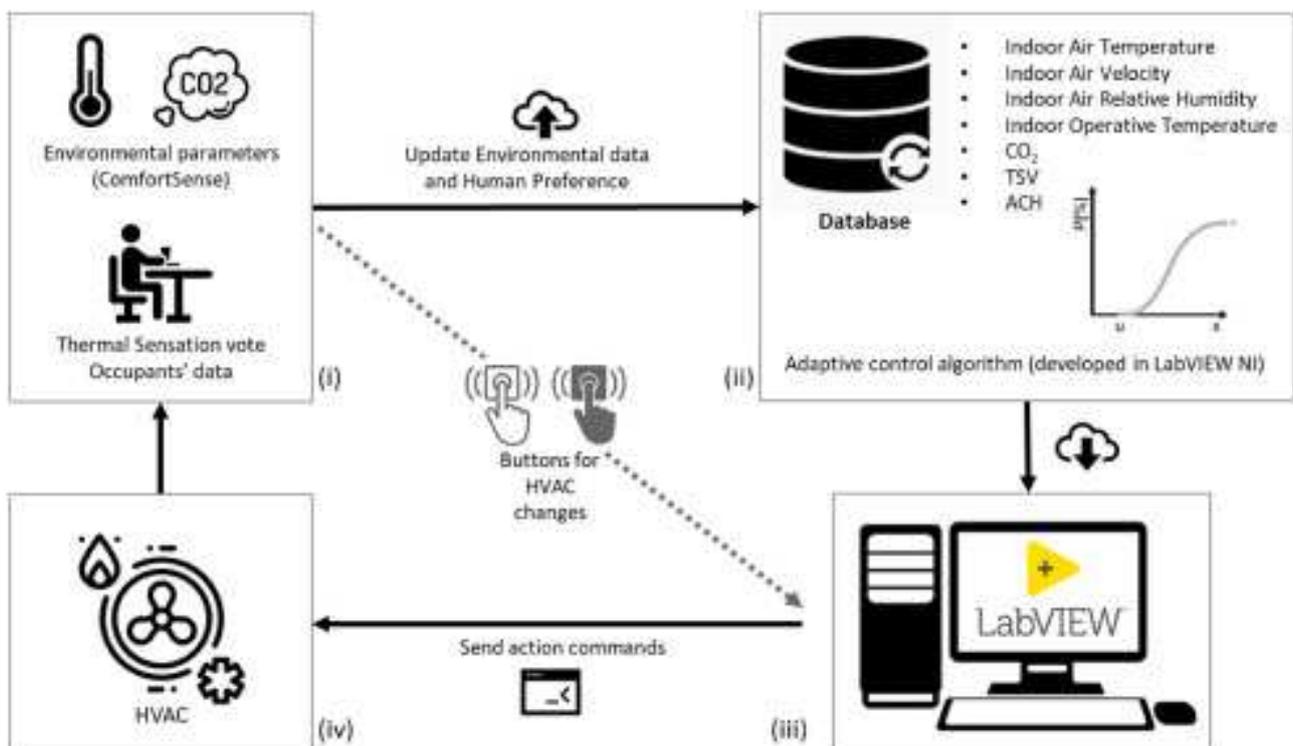
### 3.6. Sistema di controllo

Il sistema di controllo implica:

- i. La registrazione delle condizioni ambientali interne, dei dati umani (età, peso, ecc.) e della percezione;
- ii. Un database centrale supportato da un software di controllo;
- iii. Un controller programmabile;
- iv. Un sistema HVAC.

Gli utenti, durante la sperimentazione, sono stati messi in condizione di poter interagire liberamente con il sistema HVAC utilizzando un'interfaccia sviluppata ad hoc. I sensori monitorano costantemente i parametri ambientali e i voti di comfort degli utenti richiesti a intervalli di tempo prefissati.

I dati vengono inviati al data logger e al software di controllo sviluppato in *LabVIEW 2015*. In base all'algoritmo di controllo, l'azione di aumento/diminuzione del set point HVAC o modifica della portata di ventilazione viene eseguita o meno.



**Figura 11.** Diagramma concettuale del principio di funzionamento del sistema di controllo automatico implementato

In primo luogo, a partire dai dati sperimentali raccolti, sono stati sviluppati dei modelli predittivi preliminari in cui la probabilità di interazione dell'utente con il sistema HVAC è correlata ai parametri ambientali in base alle relative preferenze di comfort personalizzate.

Per eseguire l'analisi sono stati estrapolati dall'intero set di dati solo i dati corrispondenti ai momenti in cui gli utenti potevano interagire con il sistema, esprimendo la loro sensazione termica cioè ogni dieci minuti. I dati sono stati elaborati discretizzando la variabile ambientale, ovvero la temperatura operativa, in un file distinguendo un range di 0,5°C e calcolando la quantità numerica di ogni bin (inteso come il numero di volte in cui l'utente avrebbe potuto interagire con il sistema).

Dunque, all'interno di ciascun bin, la probabilità di modificare la temperatura di set point è stata ottenuta dividendo la frequenza dei voti di modifica della temperatura per la quantità di ciascun bin.

Supponendo l'interazione con il sistema HVAC, ad esempio la modifica della temperatura di set point, come dati binari (azione si/azione no), un metodo statistico utile è una regressione logistica [23,24], che viene spesso utilizzata per variabili dipendenti dicotomiche.

Alla base della regressione logistica c'è la seguente relazione:

$$\text{logit}(p) = \left( \frac{p}{1-p} \right) = fi \quad (1)$$

$$p = \frac{e^{fi}}{1 + e^{fi}} \quad (2)$$

Dove:

- $p$  è la probabilità di aumentare la temperatura in inverno o di ridurla in estate;
- $fi$  è l'equazione lineare derivata dai dati del sondaggio in funzione della temperatura operativa. L'equazione varia per l'inverno ( $i = 1$ ) o l'estate ( $i = 2$ ).

Dunque, l'analisi logistica è stata utilizzata per determinare il modello per la probabilità dell'interazione degli occupanti per la regolazione della temperatura di set point della stanza in funzione dei parametri ambientali, ossia la temperatura operativa. Per ottenere modelli di correlazione indipendenti dall'involucro edilizio, il modello di previsione si è concentrato sulle condizioni interne della stanza e quindi sulla temperatura operativa piuttosto che sulle condizioni esterne. Successivamente, è stato sviluppato un algoritmo decisionale da integrare nel framework.

Per rappresentare la natura casuale delle decisioni umane in risposta a stimoli ambientali è stato utilizzato un metodo semplice: confrontare il valore di probabilità con un numero casuale generato tra 0 e 1. Se la probabilità associata all'azione era maggiore del numero casuale, il sistema HVAC viene attivato, riscaldando in inverno e raffreddando in estate, in caso contrario, non veniva eseguita alcuna operazione. In questa fase, agli utenti era consentito continuare a esprimere la propria percezione della sensazione termica, ma non potevano modificare i set point del sistema.

I loro voti venivano registrati per verificare se l'algoritmo fosse in grado di interpretare correttamente le loro preferenze o se fosse necessario un costante riadattamento. La capacità dell'adattamento dei modelli statistici ai dati raccolti è stata valutata tramite il coefficiente di determinazione  $R^2$ . Generalmente, un valore di  $R^2$  superiore a 0,7, indica che il modello di regressione rappresenta adeguatamente il fenomeno osservato [22].

Avendo svolto l'esperimento invernale nel 2022 e 2023, è stato possibile utilizzare i dati del 2022 per sviluppare il modello di previsione da includere nel framework, mentre nell'inverno del 2023 il modello è stato testato. Per evitare che gli utenti fossero influenzati nelle loro valutazioni, non è stato comunicato loro che la percezione termica avvertita non avrebbe più potuto modificare il set point della temperatura, poiché quest'ultimo era gestito dal modello di previsione. Questa scelta è stata fatta per evitare che il comportamento degli utenti fosse condizionato dalla sensazione di non avere il controllo sulle condizioni interne [21].

## 4. Risultati

I risultati ottenuti verranno riportati in base alla suddivisione effettuata nella campagna di monitoraggio, andando a differenziare le diverse fasi analizzandole nel dettaglio per le diverse caratteristiche.

Saranno riportati i risultati sperimentali suddivisi per le diverse fasi e successivamente le informazioni riguardanti le valutazioni sul framework.

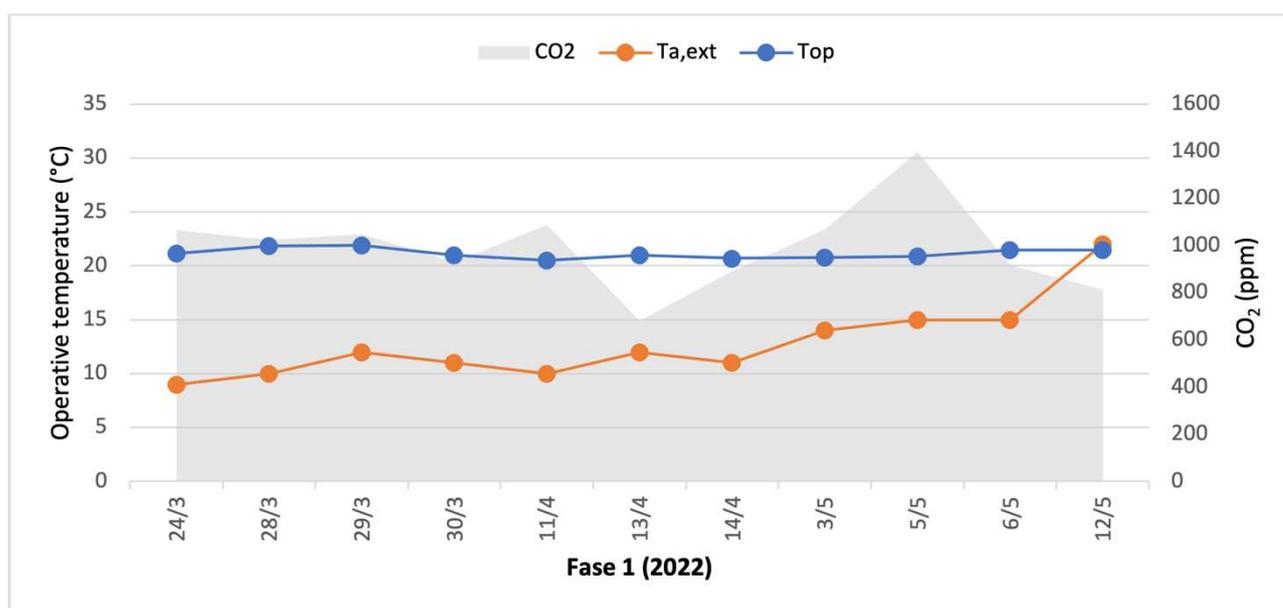
Si ricorda che:

- *Fase 1*: corrisponde al periodo di riscaldamento in cui gli utenti avevano il controllo sul set point di temperatura;
- *Fase 2*: corrisponde al periodo di riscaldamento in cui gli utenti avevano il controllo sui ricambi d'aria orari;
- *Fase 3*: corrisponde al periodo di raffreddamento in cui gli utenti avevano il controllo sia sul set point di temperatura che sui ricambi d'aria orari.

## 4.1. Risultati sperimentali

### 4.1.1. Fase 1

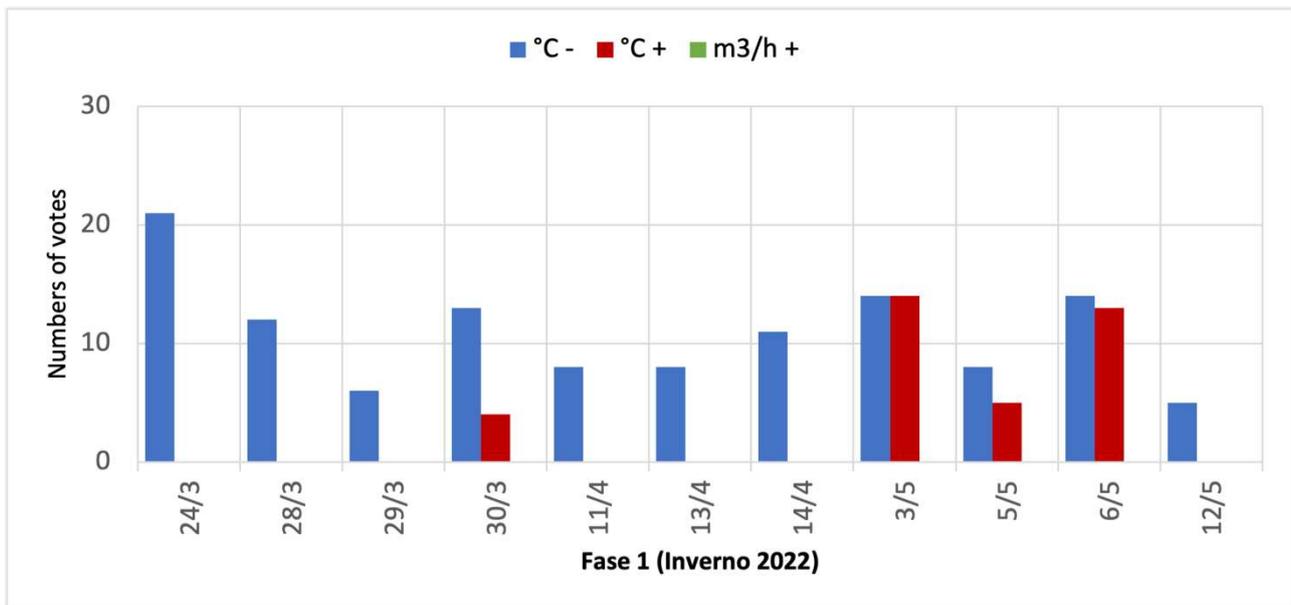
Il *grafico 1* evidenzia i risultati dell'attività sperimentale della *fase 1* mostrando i valori medi giornalieri, calcolati durante le ore di occupazione della stanza, della temperatura esterna dell'aria, della temperatura operativa interna e della concentrazione di CO<sub>2</sub>.



**Grafico 1.** Valori giornalieri, mediati nel tempo di occupazione della stanza, della temperatura dell'aria esterna, della temperatura di esercizio e dell'andamento della CO<sub>2</sub> della fase 1

Si può osservare che nella *fase 1* le medie di Top e CO<sub>2</sub> sono pari rispettivamente a 21,2°C e 993 ppm.

Infatti, il *grafico 1* mette in relazione le medie giornaliere della temperatura operativa, della temperatura dell'aria esterna e la quantità di CO<sub>2</sub> nel tempo di occupazione della stanza e questo ci permette di capire che nonostante la temperatura operativa sia perlopiù costante all'interno della stanza, se non si prevede un ricambio d'aria, la concentrazione di CO<sub>2</sub> subisce un aumento notevole.

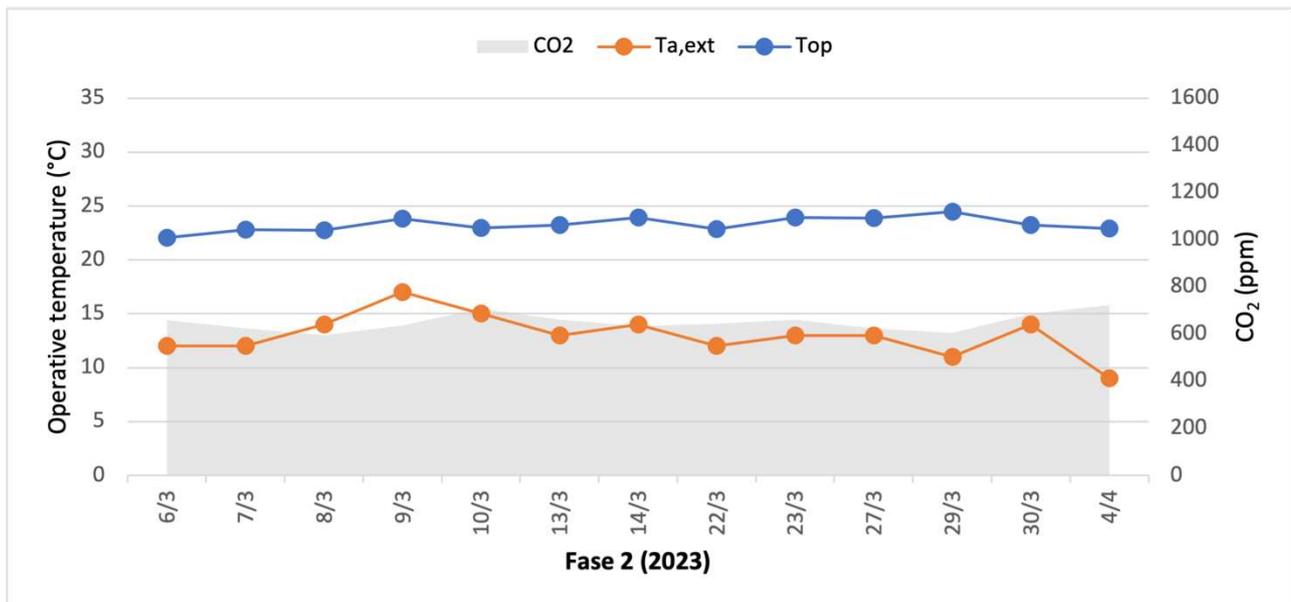


**Grafico 2.** Conteggio giornaliero delle votazioni per innalzare o abbassare la temperatura in relazione alla volontà di incrementare i ricambi d'aria orari (fase 1)

In particolare, il *grafico 2*, che fa riferimento alla *fase 1*, evidenzia il numero di volte che i soggetti hanno votato di percepire rispettivamente caldo (parte rossa) e freddo (parte blu). Per questa fase, non avendo gli utenti la possibilità di controllo del sistema di ventilazione, non è stato possibile correlare queste informazioni, diversamente dalle altre fasi.

### 4.1.2. Fase 2

Il *grafico 3* evidenzia i risultati dell'attività sperimentale della *fase 2* mostrando i valori medi giornalieri, calcolati durante le ore di occupazione della stanza, della temperatura esterna dell'aria, della temperatura operativa interna e della concentrazione di CO<sub>2</sub>.



**Grafico 3.** Valori giornalieri, mediati nel tempo di occupazione della stanza, della temperatura dell'aria esterna, della temperatura di esercizio e dell'andamento della CO<sub>2</sub> della fase 2

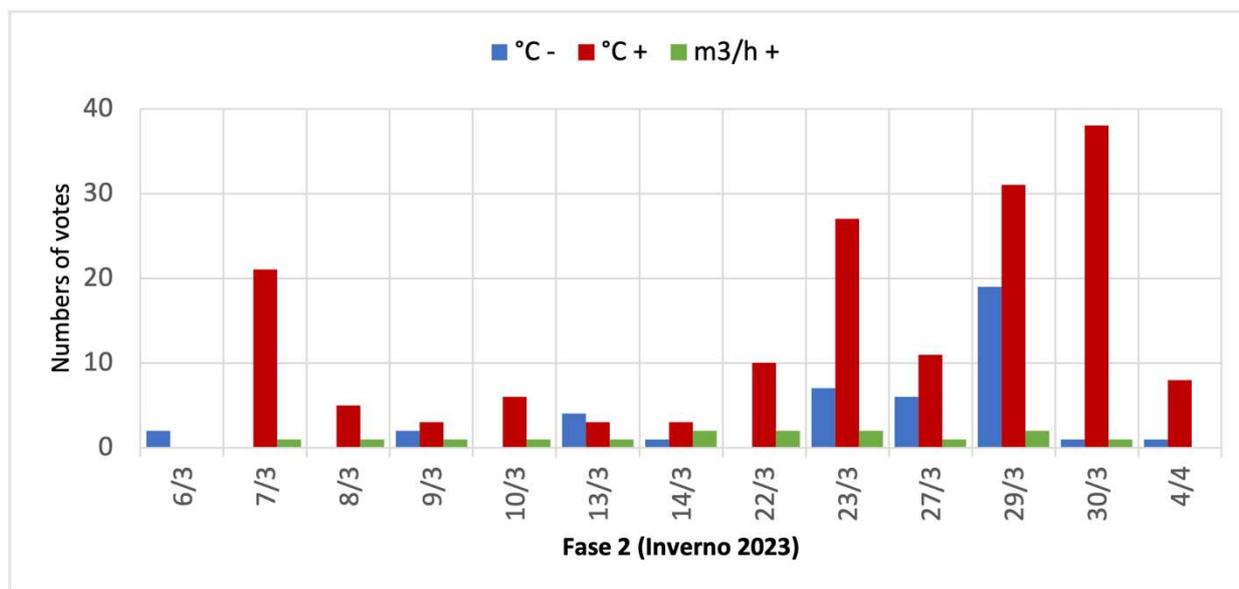
Si può osservare che nella *fase 2* le medie di Top e CO<sub>2</sub> sono pari rispettivamente a 23,3°C e 650 ppm.

In particolare, dal *grafico 3*, si noti la riduzione media del 34% della CO<sub>2</sub> della *fase 2* rispetto alla *fase 1*, i quali entrambi fanno riferimento al periodo di riscaldamento.

Questa riduzione è attribuibile al fatto che nella *fase 2*, a differenza della *fase 1*, gli utenti potevano interagire e gestire non solo il set point della temperatura, ma anche i ricambi d'aria orari, migliorando il comfort in termini di qualità dell'aria interna (IAQ).

Questo evidenzia l'importanza di condurre ricerche sperimentali sul comfort che non solo correlino la percezione termica dell'occupante ai parametri ambientali, ma che valutino anche come il reale fabbisogno termico si traduca nell'interazione tra utenti e sistemi [1].

Infatti, come suggerito dagli studi di Hu et al e He et al [1,2], un ambiente è considerato confortevole quando l'occupante non sente il bisogno di intervenire sui sistemi, in caso contrario, le esigenze di comfort non sono pienamente soddisfatte.



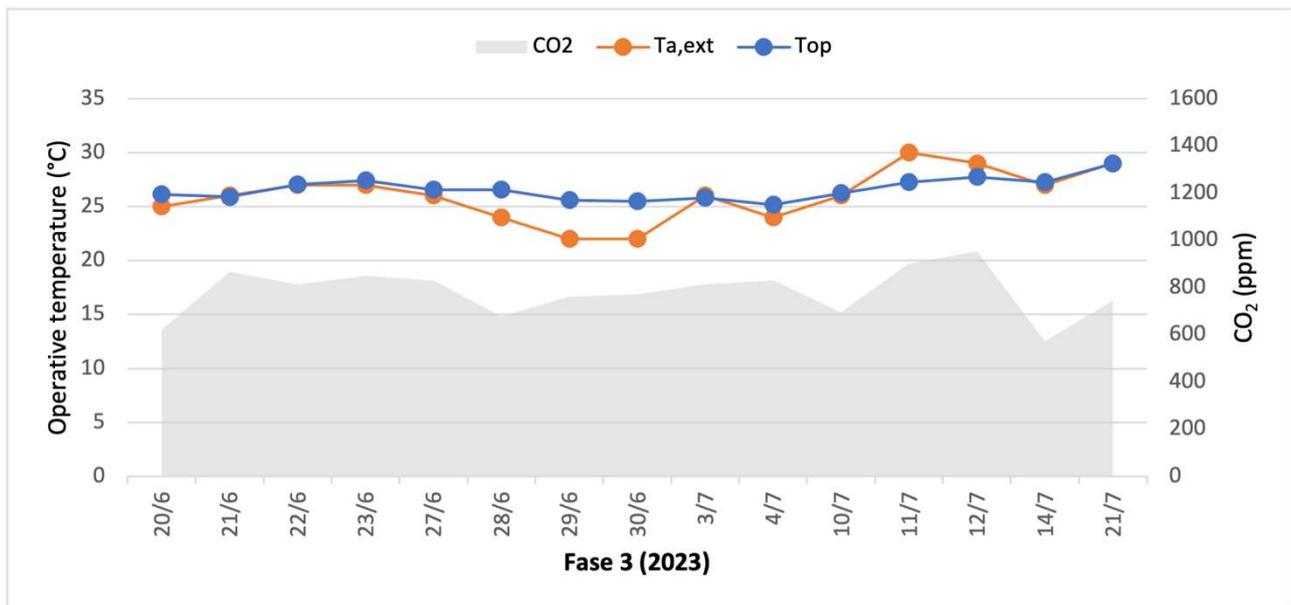
**Grafico 4.** Conteggio giornaliero delle votazioni per innalzare o abbassare la temperatura in relazione alla volontà di incrementare i ricambi d'aria orari (fase 2)

In particolare, il grafico 4, che fa riferimento alla fase 2, evidenzia la correlazione tra il numero di volte che i soggetti hanno votato di percepire rispettivamente caldo (parte rossa) e freddo (parte blu) con il numero di volte in cui hanno voluto aumentare i ricambi d'aria orari (parte verde) per migliorare la qualità dell'aria all'interno della stanza per ogni giorno di monitoraggio.

Quello che possiamo dedurre è che i soggetti hanno interagito per quasi tutti i giorni di monitoraggio di questa fase con il sistema di ventilazione. Per cui, avendo la percezione di temperature calde all'interno di un ambiente si riduce la qualità percepita dell'aria.

### 4.1.3. Fase 3

Il *grafico 5* evidenzia i risultati dell'attività sperimentale della *fase 3* mostrando i valori medi giornalieri, calcolati durante le ore di occupazione della stanza, della temperatura esterna dell'aria, della temperatura operativa interna e della concentrazione di CO<sub>2</sub>.

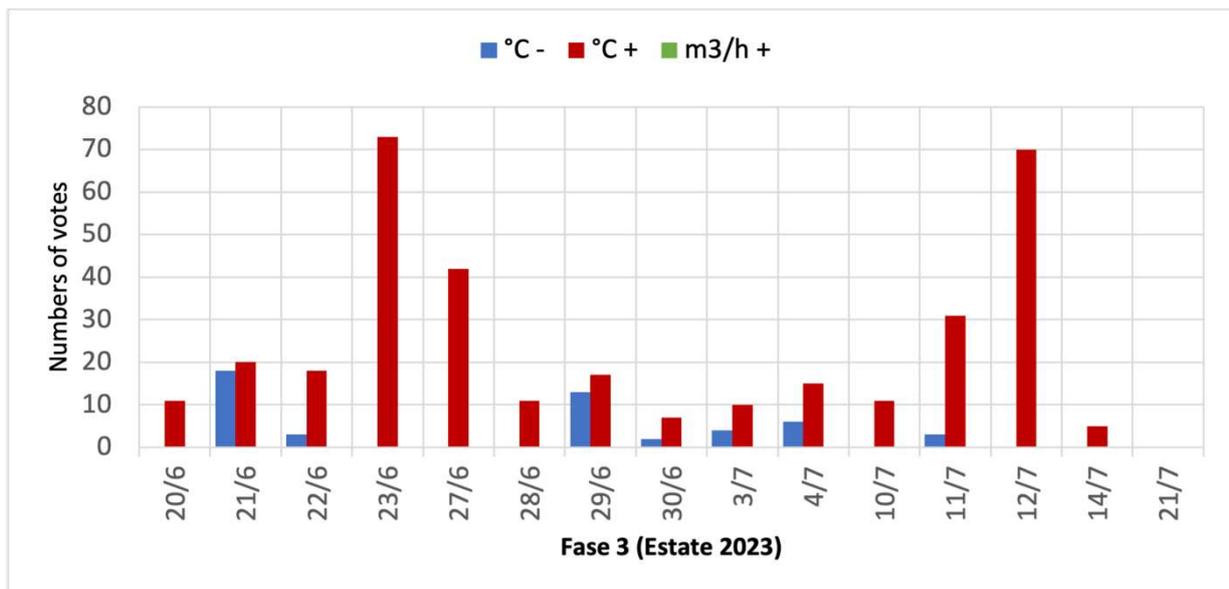


**Grafico 5.** Valori giornalieri, mediati nel tempo di occupazione della stanza, della temperatura dell'aria esterna, della temperatura di esercizio e dell'andamento della CO<sub>2</sub> della fase 3

Si può osservare che nella *fase 3* le medie di Top e CO<sub>2</sub> sono pari rispettivamente a 26,6°C e 780 ppm.

Infatti, il *grafico 5* mette in relazione le medie giornaliere della temperatura operativa, della temperatura dell'aria esterna e la quantità di CO<sub>2</sub> nel tempo di occupazione della stanza. In questo caso, la concentrazione di CO<sub>2</sub>, nonostante la differenza stagionale, è considerata nella media con un leggero aumento.

Infatti, possiamo dedurre che, oltre al controllo della temperatura, per ottenere una condizione di comfort in un ambiente è necessario coinvolgere anche il controllo del sistema di ricambio d'aria per migliorarne la concentrazione di CO<sub>2</sub>.



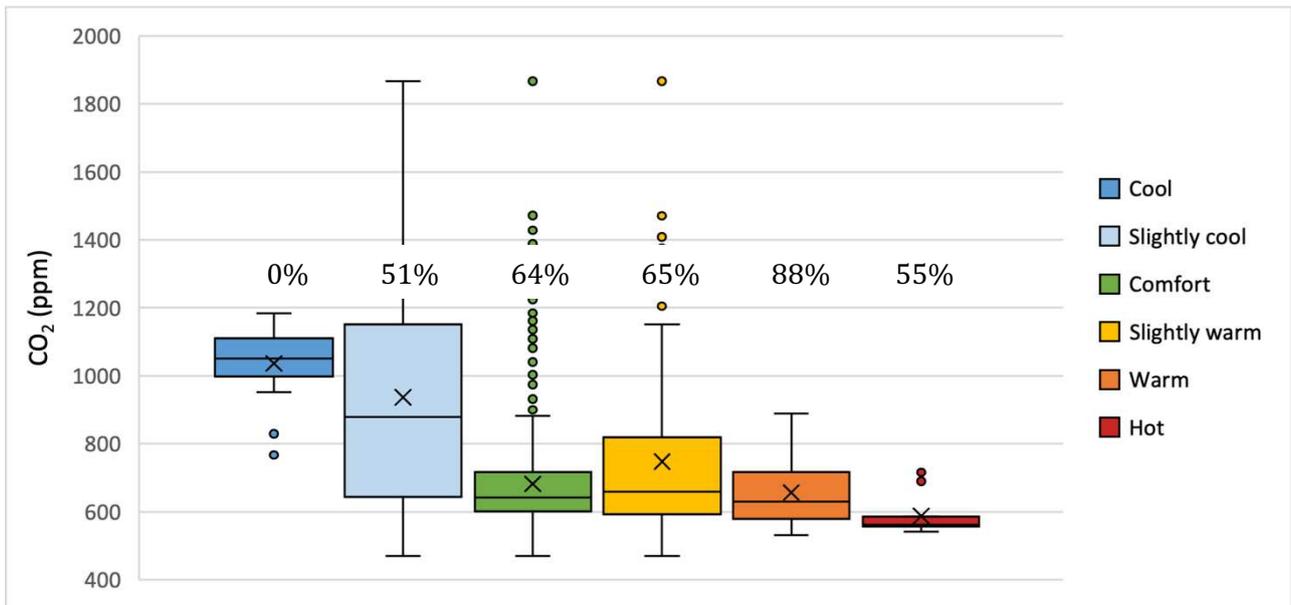
**Grafico 6.** Conteggio giornaliero delle votazioni per innalzare o abbassare la temperatura in relazione alla volontà di incrementare i ricambi d'aria orari (fase 3)

In particolare, il *grafico 6*, che fa riferimento alla *fase 3*, evidenzia la correlazione tra il numero di volte che i soggetti hanno votato di percepire rispettivamente caldo (parte rossa) e freddo (parte blu) con il numero di volte in cui hanno voluto aumentare i ricambi d'aria orari (parte in verde) per migliorare la qualità dell'aria all'interno della stanza per ogni giorno di monitoraggio.

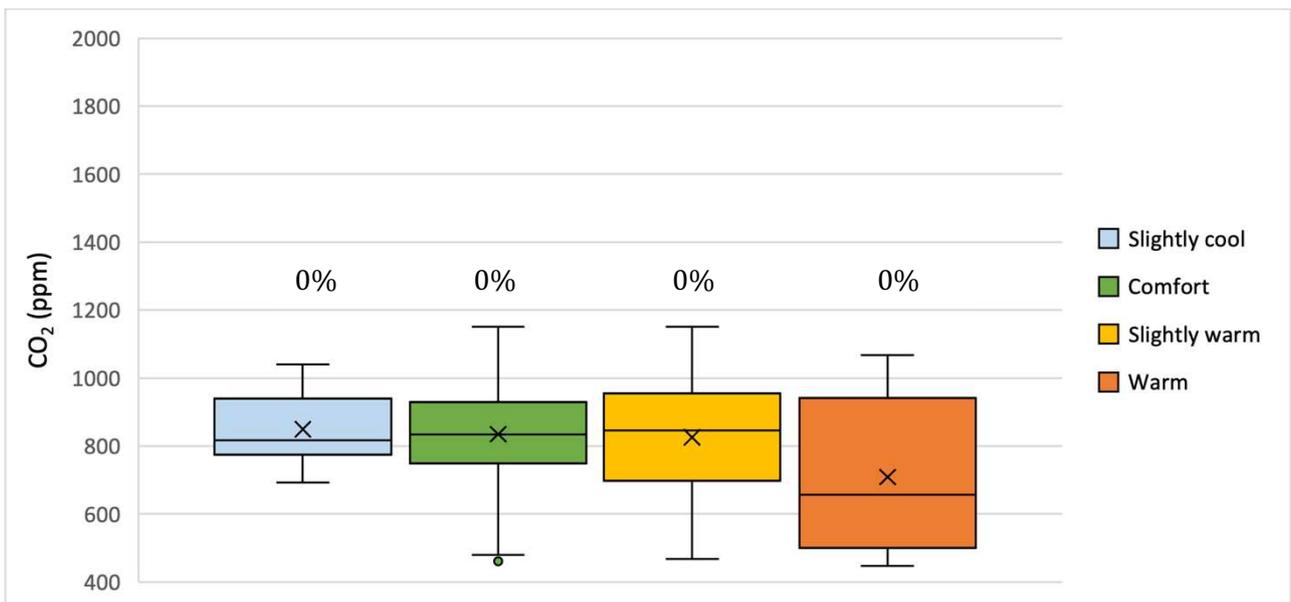
Si nota che, nonostante i soggetti avessero la disponibilità di interazione con il sistema di ricambio d'aria, non è stata registrata la necessità di attivazione di quest'ultimo. Questo perché, quando ci si trova in un ambiente in cui è attivo il sistema di raffrescamento, essendo l'aria percepita come fresca, non si hanno percezioni negative per quanto riguarda la qualità dell'aria per cui non si sente la necessità di attivazione di quest'ultimo.

#### 4.2. Incidenza della CO<sub>2</sub> e velocità dell'aria

Per analizzare l'incidenza della CO<sub>2</sub> sulla temperatura percepita vengono in aiuto i grafici 7 e 8 che rappresentano i valori di CO<sub>2</sub> all'interno della stanza, mettendoli in relazione con le sensazioni termiche percepite dagli occupanti rispettivamente per la fase di riscaldamento e di raffreddamento.



**Grafico 7.** Valutazione della CO<sub>2</sub> in funzione della percezione del comfort da parte degli occupanti nella fase di riscaldamento



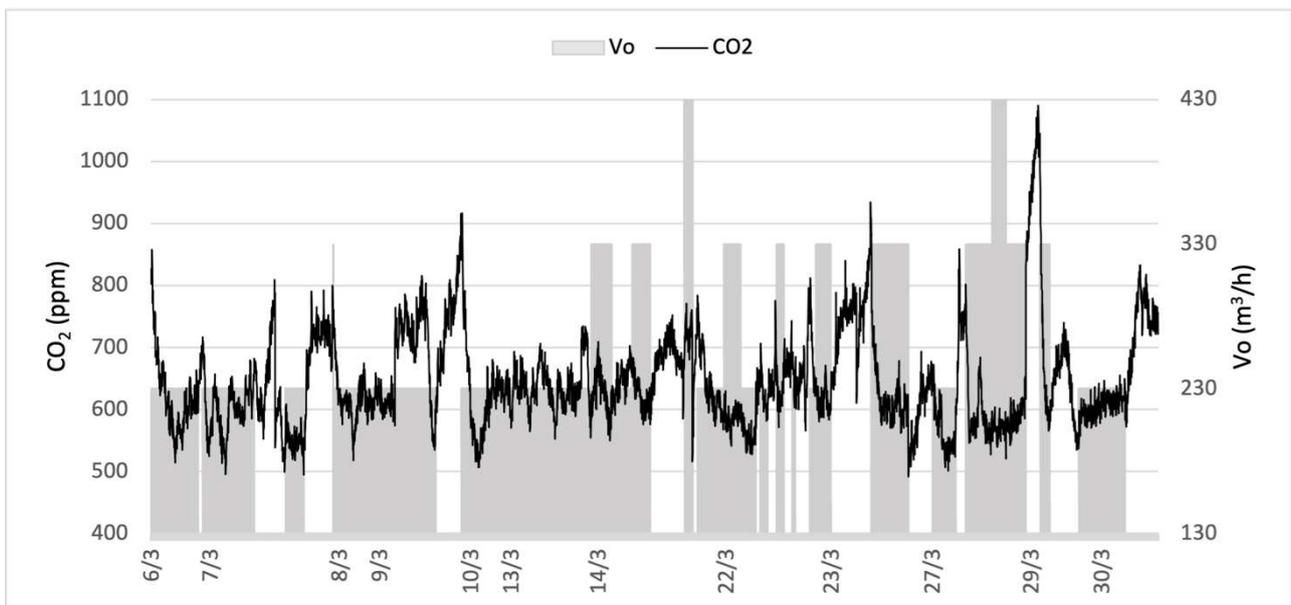
**Grafico 8.** Valutazione della CO<sub>2</sub> in funzione della percezione del comfort da parte degli occupanti nella fase di raffreddamento

Analizzando le tendenze mostrate nel *grafico 7 e 8*, è possibile affermare che:

- i. Durante la fase di riscaldamento, si nota che passando dalla sensazione termica da “freddo” a “caldo”, i livelli di CO<sub>2</sub> sono diminuiti. Questa correlazione è stata attribuita all’attivazione del sistema di ventilazione, che gli occupanti potevano gestire liberamente per mantenere un livello confortevole di qualità dell’aria, come si evince nel *grafico 9*.

I volumi d’aria orari nella stanza oscillavano da un valore fisso di 130 m<sup>3</sup>/h fino a un massimo di 430 m<sup>3</sup>/h.

Questi risultati confermano quanto riportato in letteratura: temperature elevate compromettono l’accettabilità dell’aria interna, mentre aria più fresca rende l’ambiente meno soffocante e, quindi, più tollerabile [3,4,5,6,7].



**Grafico 9.** Interazione dell'utente con il sistema di ventilazione nel periodo di riscaldamento (fase 2) per aumentare i volumi orari di ricambio dell'aria (Vo)

- ii. In modo più dettagliato, durante la fase di riscaldamento, la frequenza con cui gli utenti interagiscono con il sistema è aumentata con l’incremento del disagio causato dal caldo, raggiungendo un massimo dell’88% nella categoria “caldo”. Mentre, nella categoria “molto caldo”, la percentuale di interazione è scesa al 55%, probabilmente a causa del numero ridotto di votazioni.

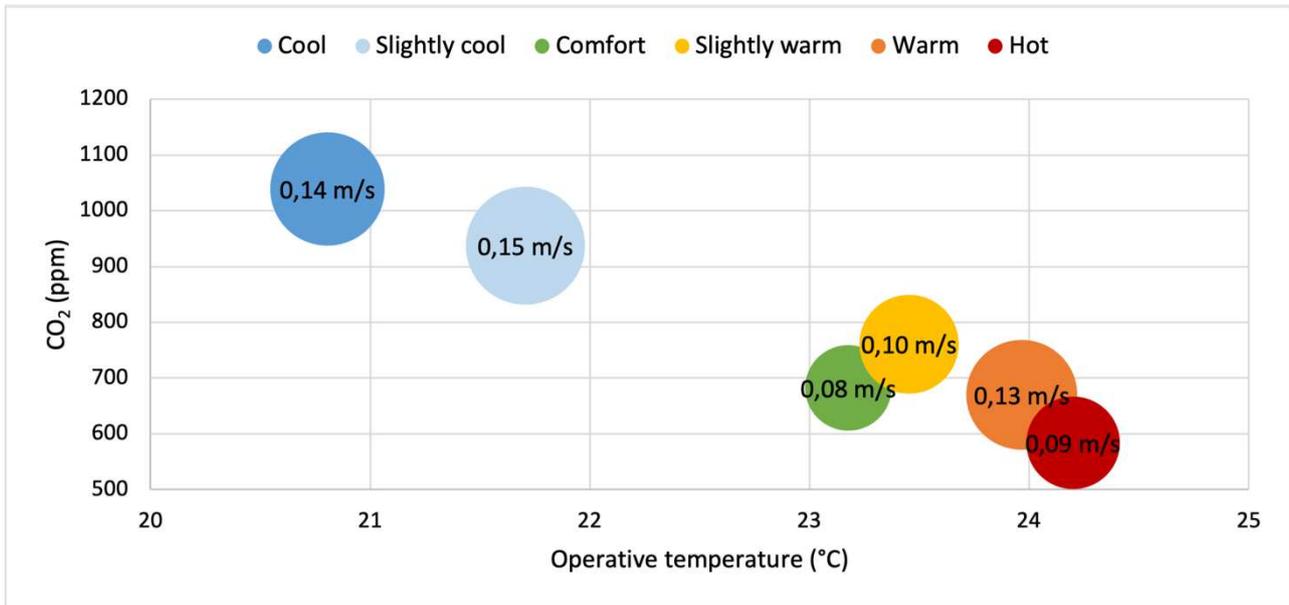
Nella categoria “freddo”, nonostante i livelli elevati di CO<sub>2</sub>, gli occupanti hanno scelto di non aumentare i ricambi d’aria.

Questo risultato è coerente con la revisione di Pei et al [7], che mette in luce la differenza tra la qualità dell’aria interna (IAQ) e la qualità dell’aria percepita (PAQ). Secondo le linee guida del CIBSE (Chartered Institute of Building Service Engineers) del Regno Unito [8] e lo standard ASHRAE 62-1989 [9], se più del 20% o del 50% degli occupanti è insoddisfatto, il PAQ è considerato inaccettabile, indipendentemente dalle misure degli inquinanti.

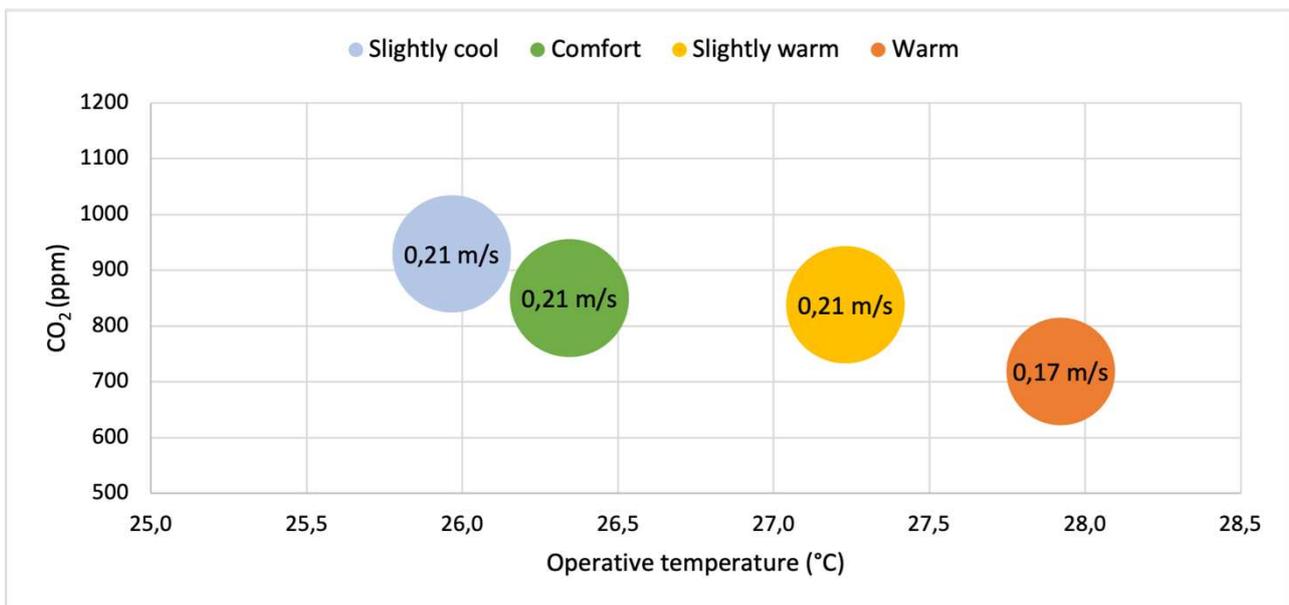
- iii. Durante la fase estiva, al contrario di quella invernale, gli occupanti non hanno mai utilizzato il sistema di ventilazione, giudicando la qualità dell’aria sempre accettabile, nonostante i livelli medi di CO<sub>2</sub> fossero più elevati rispetto all’inverno.

I dati suggeriscono che la percezione termica ha un impatto diretto sulla percezione della qualità dell’aria, influenzata a sua volta dalle condizioni climatiche stagionale, come evidenziato da Mamulova et al [13], nel concetto di dominio contestuale.

Inoltre, dai *grafici 10 e 11*, si osserva che la velocità dell’aria nella stanza variava tra 0,08 m/s e 0,15 m/s durante il riscaldamento, mentre in fase di raffreddamento variava tra 0,17 m/s e 0,21 m/s. dunque, un maggiore movimento dell’aria, come riportato anche in altri studi [7,10,11,12], sembra migliorare sensibilmente la percezione della qualità dell’aria.



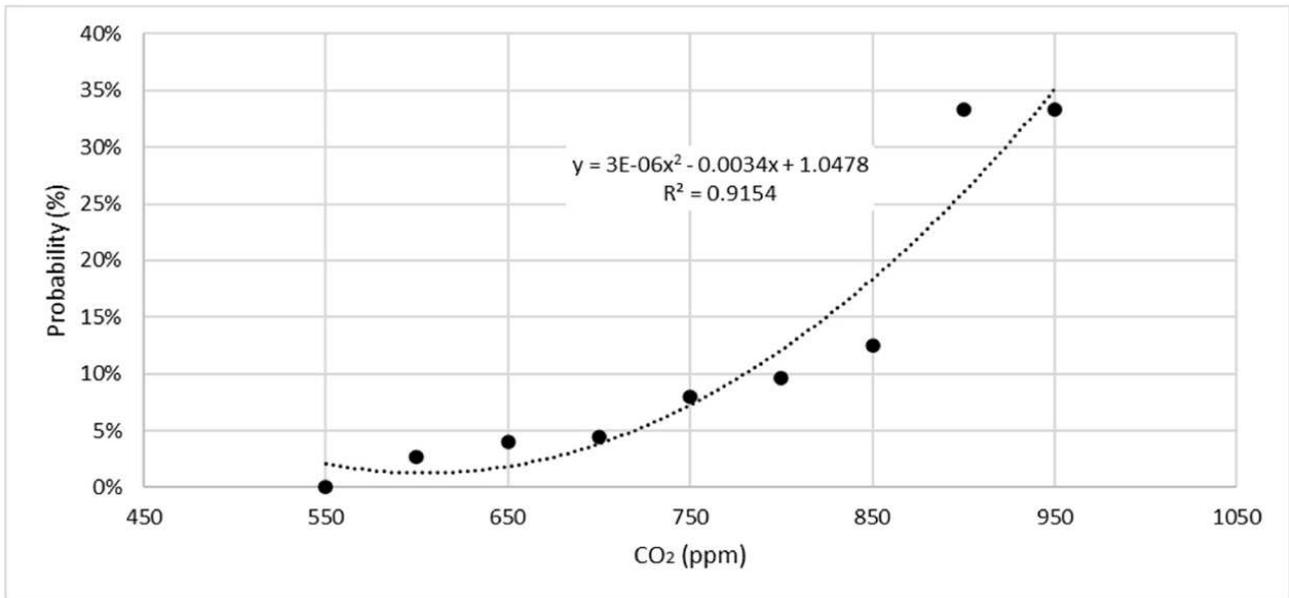
**Grafico 10.** Valori medi di CO<sub>2</sub> in funzione della temperatura operativa e della velocità dell'aria (proporzionale al diametro del cerchio) per ogni categoria di percezione del comfort degli occupanti nella fase di riscaldamento



**Grafico 11.** Valori medi di CO<sub>2</sub> in funzione della temperatura operativa e della velocità dell'aria (proporzionale al diametro del cerchio) per ogni categoria di percezione del comfort degli occupanti nella fase di raffreddamento

Come ribadito, oltre alla possibilità di indicare le proprie preferenze termiche, l'utente ha potuto anche valutare la qualità dell'aria interagendo con il sistema di ventilazione, modificando il numero di ricambi d'aria orari. L'analisi ha portato allo sviluppo del seguente modello predittivo:

$$P (\%) = 0,000006 \cdot CO_2^2 + 0,0034 \cdot CO_2 - 1,0478 \quad (6)$$



**Grafico 12.** Modello di regressione che prevede la probabilità di osservare un aumento dei ricambi d'aria ( $m^3/h$ ) in funzione della concentrazione di  $CO_2$  in una stanza aperta durante il riscaldamento

Nel grafico 12, viene mostrato un valore massimo di probabilità pari al 33%. Questo risultato è attribuibile al fatto che, nella maggior parte dei casi, l'utente ha scelto di attivare l'estrattore d'aria per lunghi periodi di tempo al fine di mantenere l'aria "pulita", stabilizzandola attorno ai 550 ppm. Di conseguenza, l'utente ha interagito poco con il sistema. Questo comportamento ha generato un numero limitato di eventi significativi rispetto al numero totale di eventi. Nonostante ciò, la curva mostra un coefficiente di correlazione  $R^2$  molto alto e significativo, pari a 0,9154.

### ***4.3. Incidenza della temperatura operativa***

Dalle valutazioni degli occupanti, è stato anche possibile determinare le temperature operative associate alle diverse sensazioni termiche, come mostrato nei *grafici 13 e 14*.

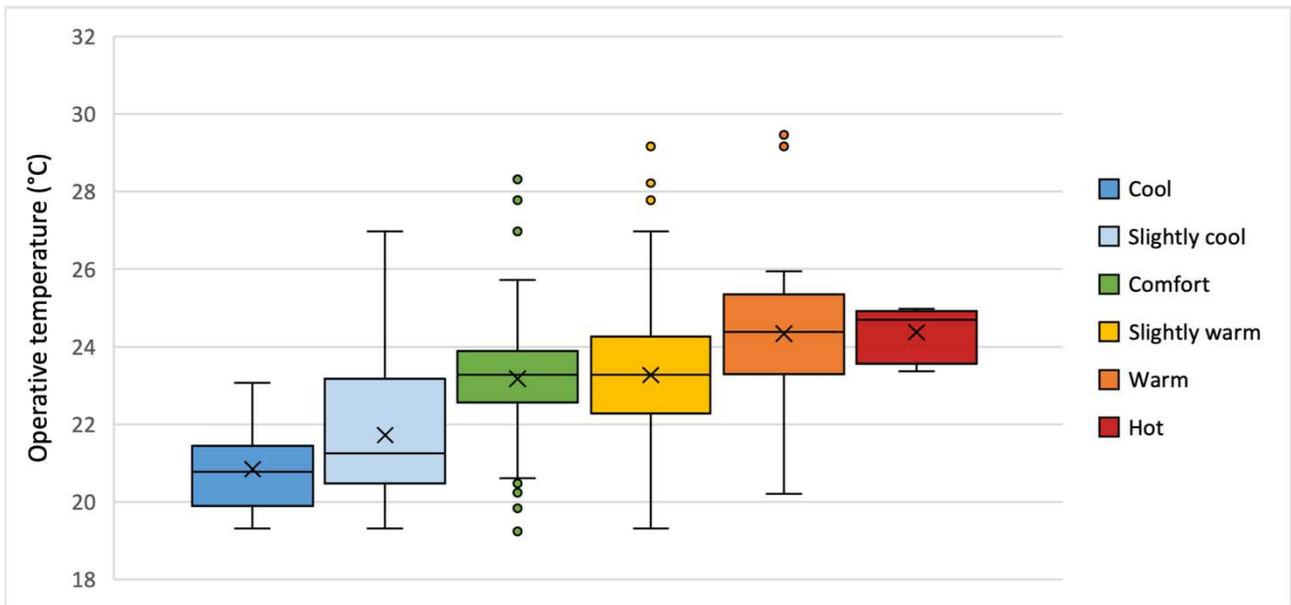
Nel periodo invernale, gli utenti hanno percepito sensazioni che variano da “freddo” a “caldo”. La temperatura media di comfort in inverno è risultata essere 23,3 °C, con valori di primo, secondo e terzo percentile rispettivamente di 22,6 °C, 23,3 °C e 23,9 °C.

Inoltre, si nota che il box plot relativo alla sensazione di “comfort” è simmetrico rispetto alla mediana ed è il più compatto rispetto alle altre sensazioni termiche espresse, indicando una bassa dispersione nei voti degli utenti (l'altezza è compresa tra 23,3 °C  $\pm$  0,6 °C).

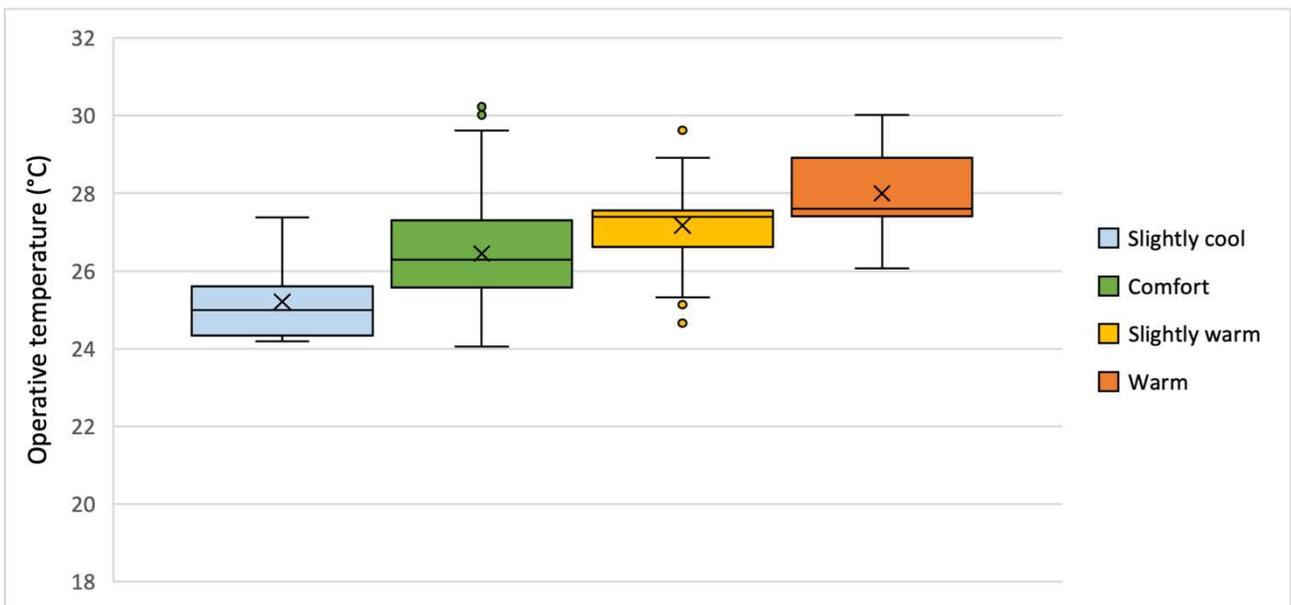
Nel periodo estivo, gli utenti hanno percepito sensazioni che variano da “leggermente fresco” a “caldo”. In estate, la temperatura media di comfort era di 26,5 °C, con valori di primo, secondo e terzo percentile rispettivamente di 25,6 °C, 26,3 °C e 27,3 °C.

In questo caso, il box plot della categoria “comfort” appare più dispersivo e leggermente asimmetrico, suggerendo che la percezione del comfort nel periodo di raffreddamento variava maggiormente tra gli utenti rispetto al riscaldamento.

Inoltre, l'andamento crescente dei vari box plot indica che la temperatura operativa ha un effetto significativo sulla sensazione termica.



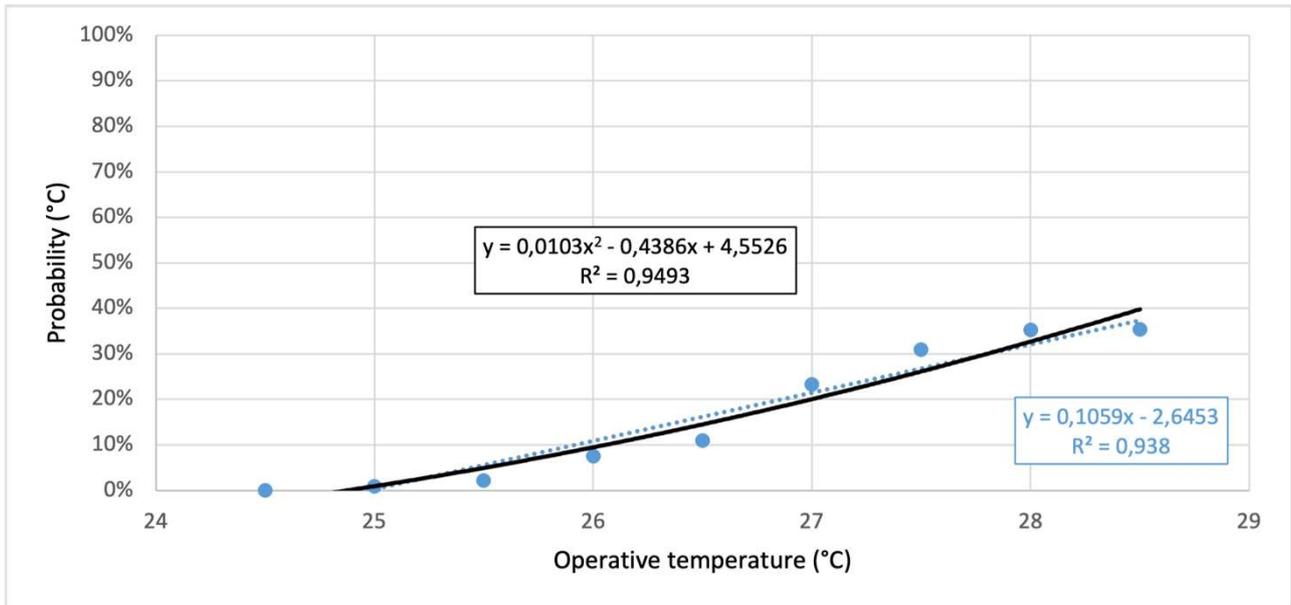
**Grafico 13.** Valutazione della temperatura operativa in funzione della percezione di comfort degli occupanti nella fase di riscaldamento



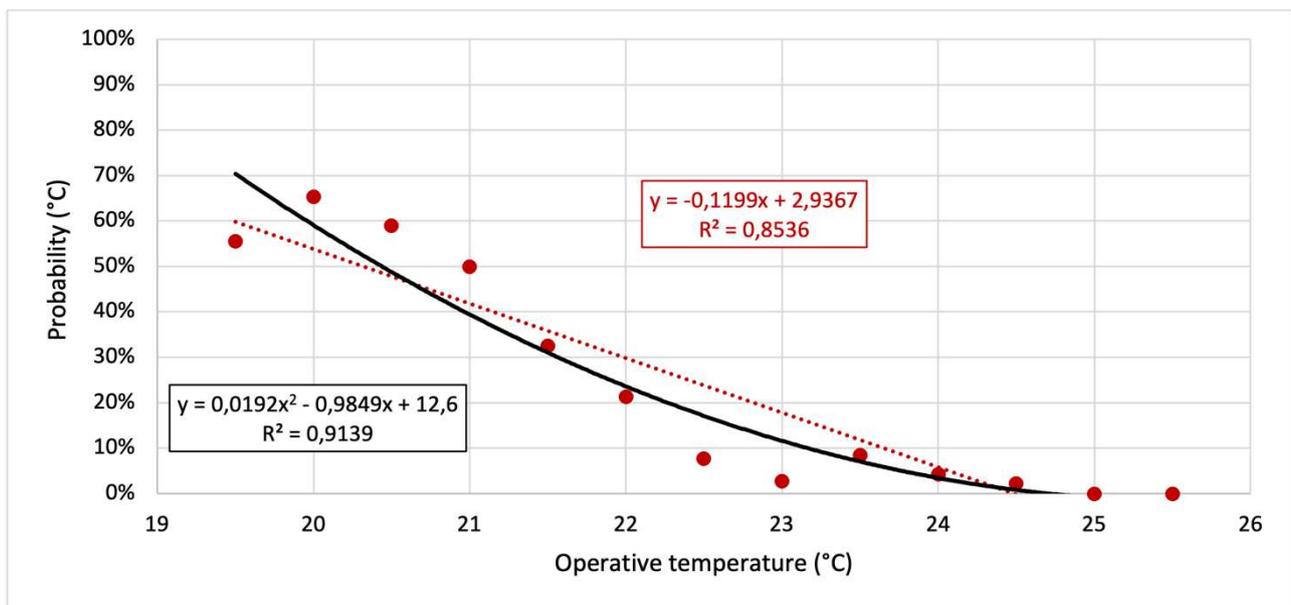
**Grafico 14.** Valutazione della temperatura operativa in funzione della percezione di comfort degli occupanti nella fase di raffreddamento

#### 4.4. Realizzazione del framework

I grafici 15 e 16 mostrano i modelli di regressione derivati dai dati sperimentali raccolti, che prevedono la probabilità che l'utente modifichi rispettivamente il set point della temperatura operativa e il tasso di ricambio d'aria orario, rispettivamente per la fase di riscaldamento e raffreddamento.

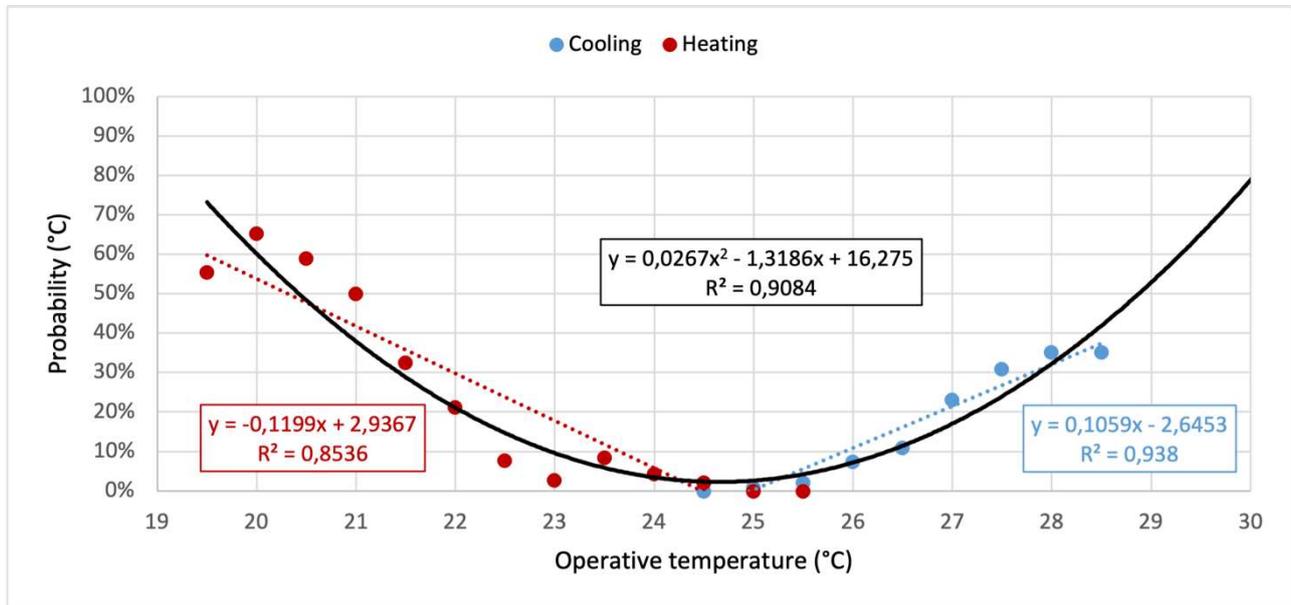


**Grafico 15.** Modello di regressione per la fase di raffreddamento



**Grafico 16.** Modello di regressione per la fase di riscaldamento

I due modelli sono stati unificati per ottenere un modello di regressione totale che prevede la probabilità di osservare un cambiamento nel set point di temperatura operativa in una stanza open space, come mostrato nel *grafico 17*.



**Grafico 17.** Modello di regressione delle temperature totale

Infatti, il *grafico 17* illustra l'andamento di tre curve distinte:

- La curva rossa rappresenta la regressione dei dati relativi al periodo di riscaldamento;
- La curva blu descrive la regressione dei dati del periodo di raffreddamento;
- La curva nera polinomiale raffigura la regressione dei dati complessivi.

Le seguenti equazioni sono definite nel *grafico 17*:

$$PH (\%) = -0,1199 \cdot Top + 2,9367 \text{ (Heating)} \quad (3)$$

$$PC (\%) = 0,1079 \cdot Top - 2,6957 \text{ (Cooling)} \quad (4)$$

Nel caso di sistemi combinati (come le pompe di calore), la curva complessiva di probabilità potrebbe essere impiegata come segue:

$$PT (\%) = 0,0263 \cdot Top^2 - 1,2962 \cdot Top + 16,0020 \quad (5)$$

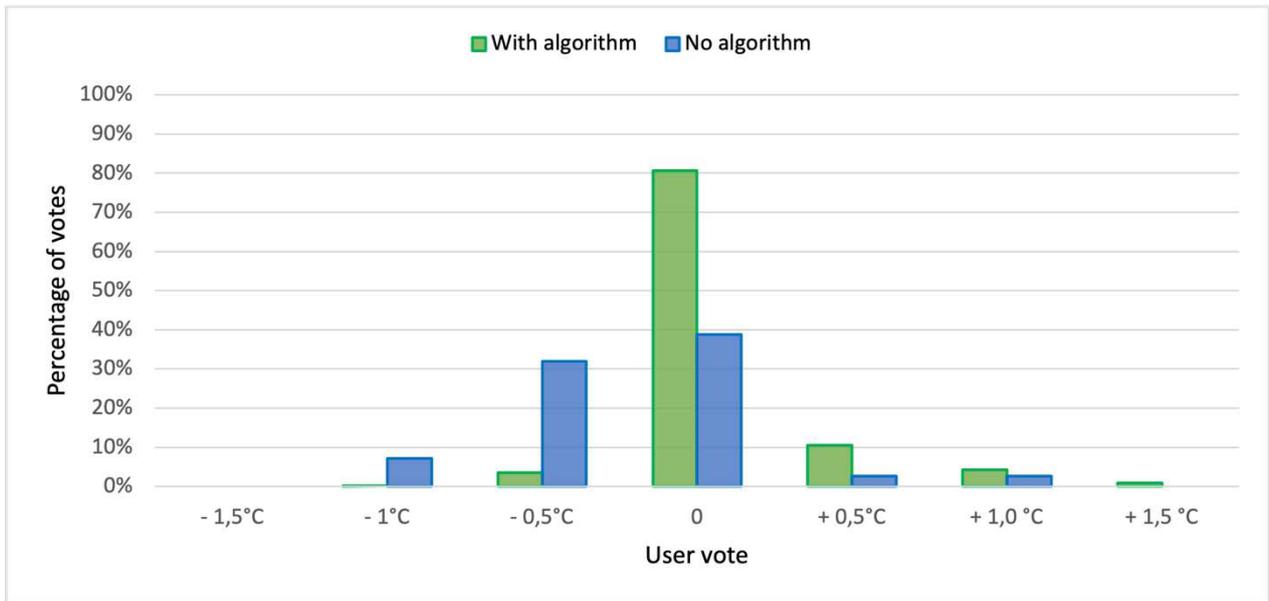
Prendendo in considerazione un tasso di insoddisfazione massimo accettabile pari al 10%, sono state individuate temperature operative di 23,7 °C per il riscaldamento e di 25,9 °C per il raffreddamento, derivate dalle regressioni lineari di ciascun periodo.

Per quanto riguarda il raffreddamento, il valore ottenuto è molto vicino al set point di riferimento di 26 °C (con una differenza di appena - 0,1 °C), mentre per il riscaldamento, la deviazione dal set point di 20 °C è più significativa (+ 3,7 °C).

Tuttavia, questo valore è coerente con i risultati di Hu et al [1], che riportano temperature tra 22,3 °C e 24,0 °C in funzione delle modalità di riscaldamento, e di Gunay el al [14], secondo cui la temperatura interna ottimale per minimizzare gli interventi manuali sul termostato è di 23,5 °C. Nonostante i diversi climi (Cina, Canada e Italia) possano influire su percezioni, adattamento e comportamenti degli occupanti [13,15,16], la temperatura di comfort durante il periodo di riscaldamento mostra variazioni minime, nell'ordine di decimi di grado, tra i vari studi. In effetti, il modello di riscaldamento prevede che a una temperatura di 20 °C circa il 56% delle persone risulti insoddisfatto.

Grazie al modello di regressione totale (curva nera), il sistema combinato è in grado di riscaldare o raffreddare l'ambiente automaticamente, basandosi sulla probabilità di soddisfazione. Il modello preposto ha il potenziale per fornire indicazioni utili a specifici segmenti di popolazione e a particolari tipologie di ambienti e potrebbe rappresentare una base per la creazione di profili di comfort termico generalizzabili [17].

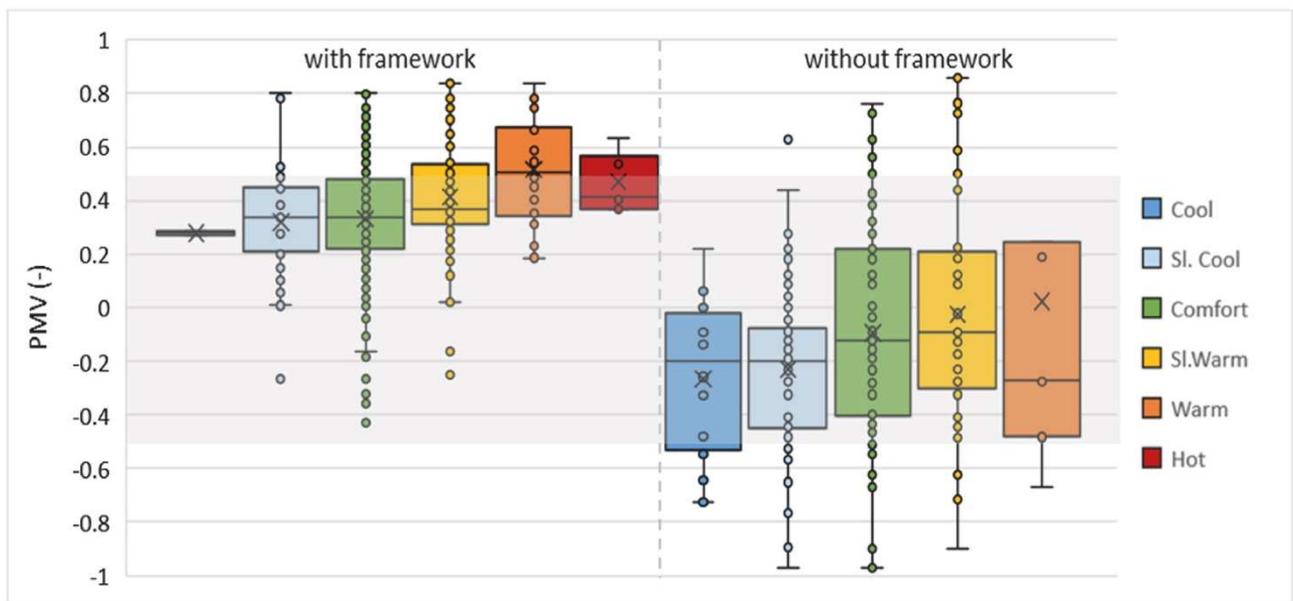
Incorporando il modello predittivo per il riscaldamento (*grafico 17*) nel contesto discusso riguardo il sistema di controllo, si può osservare nel *grafico 18* che le sensazioni termiche espresse dagli utenti, in presenza del controllo automatizzato, hanno aumentato la percentuale di valutazioni positive in condizioni di "comfort", raggiungendo l'81,9% rispetto al 38,9% rilevato in assenza di controllo automatizzato.



**Grafico 18.** Validazione del framework

Inoltre, il controllo automatizzato ha ridotto le valutazioni di disagio classificate come “leggermente fresco” e “freddo” a meno del 5%, mentre ha lievemente aumentato la percezione di “leggermente caldo” dal 2,7% al 10,7%.

I risultati ottenuti dimostrano che il controllo automatizzato è stato efficace per raggiungere l’obiettivo prefissato.



**Grafico 19.** Valutazione del PMV in relazione alla TSV degli utenti con e senza il framework

Le percezioni di comfort degli utenti, con e senza un sistema di controllo per il riscaldamento, sono state confrontate con il modello PMV di Fanger (*grafico 19*) [18], calcolato secondo la norma EN ISO 7730:2006 [19], utilizzando parametri di 1,2 met, valore corrispondente per l'attività sedentaria, e 1 clo, valore corrispondente all'abbigliamento invernale da interni.

Sebbene il PMV sia sempre all'interno della fascia di comfort di  $\pm 0,5$ , rappresentata dalla banda grigia nel *grafico 19*, gli utenti hanno riportato sensazioni termiche differenti, passando da "freddo" a "caldo" sia con che senza il modello predittivo.

Secondo Shin et al [20], la discrepanza tra PMV e TSV potrebbe essere spiegata dall'influenza della concentrazione di CO<sub>2</sub> sulla percezione termica degli occupanti, i quali tendono a reagire con una maggiore sensibilità al calore man mano che i livelli di CO<sub>2</sub> aumentano.

Questo evidenzia la necessità di sviluppare modelli di comfort che siano più centrati sull'essere umano, capaci di cogliere le percezioni individuali derivanti dall'interazione e dalla combinazione di diversi parametri ambientali.

## 5. Conclusioni

L'obiettivo principale di questo studio è stato lo sviluppo di algoritmi di controllo orientati al comfort degli utenti, progettati per automatizzare la gestione dei sistemi HVAC. Il modello è stato costruito utilizzando sia i dati relativi ai parametri ambientali sia le preferenze degli occupanti in termini di comfort termico e qualità dell'aria, con l'intento di creare un ambiente salubre e confortevole dal punto di vista termico.

In sintesi, lo studio ha portato ai seguenti risultati:

- Sono state identificate le correlazioni tra parametri ambientali e interazioni tra utenti e sistemi in uno spazio reale con più occupanti, in contrasto con ambienti simulati dove le combinazioni dei parametri ambientali sono predefinite e successivamente valutate. Secondo recenti studi [1,2], gli utenti raggiungono un vero comfort solo quando non devono interagire direttamente con i sistemi, altrimenti, sviluppano una resistenza a un ambiente percepito come non neutro senza raggiungere la condizione di comfort desiderata.

In questo contesto, con un tasso massimo accettabile di insoddisfazione del 10%, le temperature operative di comfort sono state individuate a 23,7 °C per il riscaldamento e 25,9 °C per il raffreddamento.

- È stato osservato che la percezione termica degli occupanti all'interno della stanza è influenzata soprattutto dalla temperatura operativa, mentre la percezione della qualità dell'aria dipende non solo dalla concentrazione di CO<sub>2</sub>, ma anche dalla percezione termica e dalla velocità dell'aria. In inverno, gli occupanti hanno dovuto interagire sia con il sistema di riscaldamento che con quello di ventilazione, aumentando il ricambio d'aria per ristabilire condizioni di comfort. Al contrario, in estate, pur con livelli più elevati di CO<sub>2</sub> rispetto all'inverno, il comfort generale è stato ristabilito con l'interazione esclusiva del sistema di raffreddamento.

- Sono stati individuati modelli, basati sui dati raccolto nella fase sperimentale, che indicano la probabilità di interazione degli utenti con i sistemi di riscaldamento, raffreddamento e ventilazione, con valori di  $R^2$  compresi tra 0,84 e 0,94.
- È stato proposto e sperimentalmente verificato un framework basato sui modelli sviluppati, capace di controllare automaticamente il sistema HVAC per garantire livelli adeguati di comfort per la categoria di utenti selezionati.

In particolare, l'introduzione del controllo automatico ha incrementato il livello di comfort percepito dagli occupanti dal 39% all'82%, dimostrando l'efficacia del sistema.

## 6. Bibliografia

- [1]. Resiliente o resistente ad ambienti non neutri? Uno studio comparativo sulle esigenze termiche degli occupanti in edifici con ventilazione naturale, riscaldamento gratuito e modalità di riscaldamento a pagamento.  
**J. Hu, Y. He, Q. Wang, B. Wang, X. Hao, N. Li, et al.**
- [2]. Soddisfare le esigenze termiche degli occupanti di spazi condivisi con un termostato regolabile e riscaldamento locale in inverno: uno studio sperimentale.  
**Y. He, N. Li, J. Lu, N. Li, Q. Deng, C. Tan, et al.**
- [3]. Limiti superiori dell'umidità dell'aria per prevenire il caldo fastidioso respiratorio.  
**J. Toftum, AS Jørgensen, PO Fanger.**
- [4]. Impatto della temperatura e dell'umidità dell'aria interna in un ufficio sulla qualità dell'aria percepita, sui sintomi della SBS e sulle prestazioni.  
**L. Fang, DP Wyon, G. Clausen, PO Fanger.**
- [5]. Effetti del disagio termico in un ufficio sulla qualità dell'aria percepita, sui sintomi della SBS, sulle risposte fisiologiche e sulle prestazioni umane.  
**L. Lan, P. Wargocki, DP Wyon, Z. Lian.**
- [6]. Effetti sensoriali e fisiologici sugli esseri umani dell'esposizione combinata alle temperature dell'aria e ai composti organici volatili.  
**L. Mølhave, Z. Liu, AH Jørgensen, OF Pedersen, SK Kjægaard.**
- [7]. La relazione tra qualità dell'aria interna (IAQ) e qualità dell'aria percepita (PAQ): una revisione e un'analisi del caso dell'ambiente residenziale cinese.  
**J. Pei, M. Qu, L. Sun, X. Wang, Y. Yin.**
- [8]. Sviluppo internazionale di standard per la ventilazione degli edifici.  
**BW Olesen.**
- [9]. ASHRAE, Standard 62: Ventilazione per una qualità accettabile dell'aria interna (1996).

- [10]. Influenza delle variabili ambientali sul comfort termico e sulla percezione della qualità dell'aria negli edifici per uffici nella zona climatica subtropicale umida del Brasile.  
**CC de Oliveira, RF Rupp, E. Ghisi.**
- [11]. Energia della ventilazione intelligente e prestazioni della qualità dell'aria interna negli edifici residenziali: una revisione.  
**G. Guyot, MH Sherman, IS Walker.**
- [12]. Comfort grazie al movimento dell'aria controllato personalmente in ambienti caldi e umidi.  
**Y. Zhai, H. Zhang, Y. Zhang, W. Pasut, E. Arens, Q. Meng.**
- [13]. Parliamo di scalabilità: lo stato attuale dei modelli di comfort termico multi-dominio come strumenti di supporto per la progettazione di edifici per uffici.  
**E. Mamulova, M. Loomans, R. Loonen, M. Schweiker, H. Kort..**
- [14]. Modellazione e analisi delle richieste indesiderate di modifica del setpoint di temperatura negli edifici per uffici.  
**HB Gunay, W. Shen, G. Newsham, A. Ashouri.**
- [15]. Preferenze di temperatura di comfort più elevate per cinesi e giapponesi antropometricamente abbinati rispetto a individui bianchi-occidentali-medio-europei che utilizzano un sistema di comfort/raffreddamento personale.  
**Di G. Havenith, K. Griggs, Y. Qiu, L. Dorman, V. Kulasekaran, S. Hodder.**
- [16]. Revisione degli approcci multidominio alla percezione e al comportamento ambientale indoor.  
**M. Schweiker, E. Ampatzi, MS Andargie, RK Andersen, E. Azar, VM Barthelmes, et al.**
- [17]. Modelli di comfort personale: un nuovo paradigma nel comfort termico per il controllo ambientale incentrato sugli occupanti.  
**J. Kim, S. Schiavon, G. Brager.**

- [18]. Fisiologia umana per il controllo HVAC basato sul comfort termico personale: una revisione.  
**DI Bogatu, J. Shinoda, JJ Aguilera, BW Olesen, F. Watanabe, Y. Kanek, et al.**
- [19]. UNI EN ISO 7730:2006. Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione analitica e interpretazione del comfort termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di comfort termico locale.  
**UNI-Ente Nazionale Italiano di Unificazione.**
- [20]. Uno studio sui cambiamenti nella sensazione termica degli occupanti dovuti alla concentrazione di CO<sub>2</sub> utilizzando PMV e TSV.  
**H. Shin, M. Kang, S.-H. Mun, Y. Kwak, J.-H. Huh.**
- [21]. Esplorare l'impatto del controllo percepito sul comfort termico e sulla percezione della qualità dell'aria interna nelle scuole.  
**G. Torriani, G. Lamberti, F. Fantozzi, F. Babich.**
- [22]. Interazioni con le aperture delle finestre da parte degli occupanti dell'ufficio.  
**F. Haldi, D. Robinson.**
- [23]. Una revisione della letteratura sui fattori trainanti e sugli eventi contestuali che influenzano i comportamenti degli occupanti negli edifici.  
**F. Stazi, F. Naspi, M. D'Orazio.**
- [24]. Impatto del comportamento degli occupanti sugli edifici a energia zero.  
**F. Stazi, F. Naspi.**
- [25]. Standard 55-2023: Condizioni ambientali termiche per l'occupazione umana. Am Soc Heating.  
**A. Ashrae.**
- [26]. EN ISO 7726:2001 Ergonomia dell'ambiente termico - Strumenti per la misura di grandezze fisiche (2001).  
**CEN Comitato europeo di normazione.**

- [27]. Indagine sulla qualità dell'aria interna dell'ambiente scolastico e stima dei rischi per la salute: misurazioni bistagionali nelle scuole primarie di Kozani, Grecia.  
**KK Kalimeri, DE Saraga, VD Lazaridis, NA Legkas, DA Missia, EI Tolis, et al.**
- [28]. Valutazioni delle interazioni degli utenti con soluzioni a risparmio energetico: una revisione sistematica.  
**Z. Ekim, P. Mattsson, R. Bernardo.**
- [29]. Automazione dell'interazione tra occupanti ed edificio tramite la suddivisione in zone intelligente dei carichi termostatici: un approccio di auto-regolazione commutata.  
**S. Baldi, CD Korkas, M. Lv, EB Kosmatopoulos.**
- [30]. 9 - Microreti connesse alla rete: gestione della domanda tramite controllo distribuito e ottimizzazione human-in-the-loop.  
**CD Korkas, S. Baldi, EB Kosmatopoulos.**
- [31]. Prestazioni energetiche e soddisfazione dell'occupazione: un confronto tra due edifici strettamente correlati.  
**L. Sawyer, P. De Wilde, S. Turpin-Brooks.**
- [32]. Gli edifici verdi sono più soddisfacenti e confortevoli?  
**Z. Gou, D. Prasad, S. Siu-Yu Lau.**
- [33]. Importanza dell'accuratezza delle previsioni energetiche per gli edifici a energia zero.  
**F. Stazi, F. Naspi.**
- [34]. Differenza individuale nel comfort termico: una revisione della letteratura.  
**Z. Wang, R. de Dear, M. Luo, B. Lin, Y. He, A. Ghahramani, et al.**
- [35]. Revisione critica degli standard per l'ambiente termico interno e la qualità dell'aria.  
**D. Khovalyg, OB Kazanci, H. Halvorsen, I. Gundlach, WP Bahnfleth, J. Toftum, et al.**

- [36].Linea guida 10P, Interazioni che influenzano il raggiungimento di ambienti interni accettabili (2010).  
**ASHRAE.**
- [37].Qualità ambientale interna multi-dominio negli edifici: una revisione della loro interazione e degli effetti combinati sulla soddisfazione degli occupanti.  
**Giovanni Zhao Li.**
- [38].Effetti combinati dei fattori ambientali sulla percezione umana e sulle prestazioni oggettive: una revisione dei lavori sperimentali di laboratorio.  
**S. Torresin, G. Pernigotto, F. Cappelletti, A. Gasparella.**
- [39].Un quadro di mappatura spaziale del comfort termico e della qualità dell'aria (SMTC-AQ) per l'ambiente costruito utilizzando un approccio di fluidodinamica computazionale.  
**TS Rajput, A. Thomas.**
- [40].Uno studio sulle prestazioni di apprendimento degli alunni e sul comfort termico delle scuole primarie in Cina.  
**Giovanni Battista Liu.**
- [41].Linee guida dell'OMS per la qualità dell'aria interna: inquinanti selezionati - Organizzazione Mondiale della Sanità, Ufficio Regionale per l'Europa (2010).  
**Organizzazione WH, altri.**
- [42].Un'indagine longitudinale sugli stress dell'ambiente di lavoro sulle prestazioni e sul benessere dei lavoratori d'ufficio.  
**S. Agnello, KCS Kwok.**
- [43].Controllo HVAC e delle finestre incentrato sugli occupanti: un modello di apprendimento di rinforzo per migliorare il comfort termico interno e l'efficienza energetica.  
**Giovanni Battista Gou.**

- [44]. Valutazione del consumo energetico degli impianti di condizionamento dell'aria per gli edifici pubblici. Decreto di controllo cinese 2019.  
**Giovanni Battista Dong.**
- [45]. Libro dei dati energetici degli edifici.  
**DoE USA, altri.**
- [46]. Un nuovo modello di comfort termico basato su parametri fisiologici per la progettazione e il controllo intelligenti di sistemi HVAC ad alta efficienza energetica.  
**G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, GF Giuzio, A. Palombo, G. Russo**
- [47]. Stato dell'arte, sfide e nuove prospettive della legge sulla domanda di comfort termico per il controllo intelligente on-demand dei sistemi di riscaldamento, ventilazione e aria condizionata.  
**X. Zhao, Y. Yin, Z. He, Z. Deng.**
- [48]. Inferenza del comfort termico personalizzato mediante immagini video RGB per il controllo HVAC distribuito.  
**F. Jazizadeh, W. Jung.**
- [49]. Adattamento termico nel controllo HVAC guidato dagli occupanti.  
**JJ Aguilera, OB Kazanci, J. Toftum.**
- [50]. Operazioni HVAC decentralizzate e guidate dall'utente per il comfort termico, per una migliore efficienza negli edifici per uffici.  
**F. Jazizadeh, A. Ghahramani, B. Becerik - Gerber, T. Kichkaylo, M. Orosz.**
- [51]. Modelli di comfort personale basati su un esperimento di 6 mesi che utilizza parametri ambientali e dati da dispositivi indossabili.  
**F. Tartarini, S. Schiavon, M. Quintana, C. Miller.**
- [52]. Prestazioni degli algoritmi di apprendimento automatico per la previsione del comfort termico individuale basati su dati provenienti da contesti professionali e pratici.  
**C. Yu, B. Li, Y. Wu, B. Chen, R. Kosonen, S. Kilpelainen, et al.**

- [53]. Progetto Coolbit: il tuo orologio può prevedere lo stress termico e la sensazione di comfort termico?  
**Environ Res Lett.**
- [54]. Indagine quantitativa sulla selezione delle parti del corpo per la previsione delle preferenze termiche complessive personali basata sui dati.  
**K. Zhang, H. Yu, Y. Tang, M. Luo, Z. Su, C. Li.**
- [55]. Rilevamento intelligente dello stato termico degli occupanti interni tramite termografia a infrarossi, visione artificiale e apprendimento automatico.  
**Y. He, H. Zhang, E. Arens, A. Merritt, C. Huizenga, R. Levinson, *et al.***
- [56]. Algoritmi di apprendimento automatico applicati alla previsione del comfort termico complessivo personale utilizzando le temperature della pelle e il comportamento di riscaldamento degli occupanti.  
**K. Katić, R. Li, W. Zeiler.**
- [57]. Previsione del comfort personale basata sull'apprendimento automatico tramite rilevamento indossabile della frequenza cardiaca e della temperatura della pelle.  
**T. Chaudhuri, YC Soh, H. Li, L. Xie..**
- [58]. Effetti delle piccole dimensioni del campione nel riconoscimento di modelli statistici: raccomandazioni per i professionisti.  
**SJ Raudys, AK Jain, altri.**
- [59]. Automazione basata sui dati dei sistemi HVAC: uno studio sperimentale in un'aula studio universitaria.  
**Serena Summa, Luca Tarabelli, Costanzo Di Perna, Francesca Stazi.**