



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Edile - Architettura

**ANALISI SPERIMENTALE PARAMETRICA: INCIDENZA DELLA
VENTILAZIONE MECCANICA E DELLA TIPOLOGIA DI
FINESTRE SUL COMFORT TERMICO INTERNO**

**PARAMETRIC EXPERIMENTAL ANALYSIS: IMPACT OF
MECHANICAL VENTILATION AND WINDOW TYPE ON
INDOOR THERMAL COMFORT**

Relatore:
Prof.ssa Francesca Stazi

Correlatore:
Dott. Serena Summa

Tesi di Laurea di:
Giada Sofia Gregori

INDICE

ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	3
1 STATO DELL'ARTE	6
2 OBIETTIVI	8
3 METODOLOGIA	10
3.1 Il caso di riferimento: la classe campione	10
3.2 Il caso studio: la Test-Room (o camera climatica)	13
3.3 Monitoraggio della Test-Room: i metodi	16
3.3.1 L'allestimento della Test-Room	16
3.3.2 Il progetto di monitoraggio	21
3.3.3 Parametri ambientali fondamentali: temperatura dell'aria, temperatura dell'aria, velocità dell'aria, draught rate, PMV, PPD	28
3.3.4 Strumenti	31
3.3.5 Studio dei dati ottenuti: le Mappe del Comfort	41
3.4 Riferimenti normativi	46
4 RISULTATI	48
4.1 Incidenza della velocità dell'impianto in funzione della trasmittanza termica del vetro	48
4.1.1 EH – Electric Heater	49
4.1.2 ER – Electric Radiator	66

5	DISCUSSIONI	114
5.1	Temperature (°C)	114
5.1.1	Air temperature	114
5.1.2	Operative temperature	117
5.2	Air velocity (m/s)	119
5.3	Draught rate (%)	121
5.4	Matrice di correlazione	123
6	CONCLUSIONI	125
	BIBLIOGRAFIA	127

ABSTRACT

Questa tesi analizza l'importanza della progettazione degli edifici scolastici in relazione alla Qualità Interna Ambientale (IEQ), concentrandosi sul comfort termico. La ricerca esamina tre configurazioni di aule scolastiche (quadrate, larghe e profonde) per valutare come le diverse disposizioni spaziali influenzino questo aspetto.

Il lavoro si articola in più fasi, a partire dall'analisi del contesto attuale, svolta precedentemente, degli edifici scolastici in Italia, evidenziando le principali carenze strutturali e l'urgenza di interventi migliorativi. Successivamente, un monitoraggio ambientale è stato condotto in una test-room utilizzando strumenti avanzati come il ComfortSense Dantec e un Manichino termico per raccogliere dati su vari parametri ambientali, come la temperatura dell'aria e operativa, la velocità dell'aria, il draught rate, il PMV e il PPD. I dati acquisiti sono stati analizzati e visualizzati attraverso mappe del comfort create con Tecplot360, permettendo di identificare zone critiche all'interno delle aule.

Dai risultati ottenuti emerge come la scelta della tipologia di riscaldamento (Electric Heater ,EH e Electric Radiator ,ER) possa influenzare significativamente il comfort percepito dagli occupanti. Il radiatore ad olio elettrico ha mostrato una distribuzione del calore più uniforme rispetto alla stufa elettrica.

Un aspetto chiave della ricerca è l'analisi dell'effetto della trasmittanza termica del vetro sulle condizioni interne delle aule, dimostrando che questa incide più significativamente rispetto al sistema di ventilazione meccanica.

La tesi restituisce un quadro di analisi utile a migliorare la progettazione degli edifici scolastici attraverso indicazioni riguardo l'adozione di vetri a bassa trasmittanza, l'uso di sistemi di riscaldamento più efficienti e una disposizione spaziale che massimizzi il comfort. Questi interventi non solo migliorerebbero il comfort degli occupanti, ma avrebbero anche un impatto positivo sull'efficienza energetica delle scuole.

ABSTRACT

This thesis analyzes the importance of school building design in relation to Indoor Environmental Quality (IEQ), focusing specifically on thermal comfort. The research examines three configurations of classrooms (square, wide, and deep) to evaluate how different spatial arrangements influence this aspect.

The work is divided into several phases, starting with an analysis of the current context, previously conducted, of school buildings in Italy, highlighting the main structural deficiencies and the urgency for improvement interventions. Subsequently, an environmental monitoring was conducted in a test-room using advanced instruments such as the ComfortSense Dantec and a thermal mannequin to collect data on various environmental parameters, such as air and operative temperature, air velocity, draught rate, PMV, and PPD. The acquired data were analyzed and visualized through comfort maps created with Tecplot360, allowing the identification of critical zones within the classrooms.

The results obtained show how the choice of heating type (Electric Heater, EH, and Electric Radiator, ER) can significantly influence the comfort perceived by occupants. The electric oil radiator demonstrated a more uniform heat distribution compared to the electric stove.

A key aspect of the research is the analysis of the effect of glass thermal transmittance on the internal conditions of classrooms, showing that this has a more significant impact compared to the mechanical ventilation system.

The thesis provides an analysis framework useful for improving school building design through recommendations regarding the adoption of low transmittance glass, the use of more efficient heating systems, and a spatial arrangement that maximizes comfort. These interventions would not only improve the occupants' comfort but also have a positive impact on the energy efficiency of schools.

INTRODUZIONE

La nostra generazione è ampiamente etichettata come "Indoor Generation", in studi recenti, come quello condotto da YouGov, che mettono in luce quanto il nostro tempo sia prevalentemente trascorso in ambienti chiusi. In effetti, circa il 90% della nostra vita si svolge all'interno di spazi delimitati, come abitazioni, uffici, scuole e palestre, il che corrisponde a circa 22 ore su 24 della nostra giornata.

La progettazione di questi ambienti diventa quindi un argomento cruciale e di grande attualità, portando con sé la necessità di creare ambienti interni salubri e confortevoli. In questo contesto, migliorare la qualità ambientale interna, ridurre l'impatto ambientale degli edifici, aumentare l'efficienza energetica e proteggere il benessere degli occupanti sono diventati obiettivi condivisi dalla comunità tecnico-scientifica, che ha rivolto sempre di più la sua attenzione alla Qualità Ambientale Interna (IEQ).

La qualità ambientale interna, o IEQ, si riferisce alla condizione di benessere percepita da un individuo in un ambiente chiuso. Questo concetto è influenzato da vari fattori, tra cui temperatura, umidità, livello di rumorosità e illuminazione. L'obiettivo dell'IEQ è la progettazione degli spazi interni deve quindi bilanciare questi elementi per creare ambienti che siano non solo funzionali, ma anche piacevoli e salubri. Tuttavia, raggiungere un equilibrio ottimale tra questi diversi aspetti rappresenta una sfida complessa, poiché spesso i vari fattori sono trattati in modo separato. È fondamentale adottare un approccio integrato che consideri le interazioni tra i diversi elementi, anziché cercare di massimizzare il rendimento individuale di ciascuno. Una buona IEQ, ben studiata e progettata, risulta però fondamentale, poiché può migliorare la produttività, la soddisfazione e la salute degli occupanti degli edifici, sia che si tratti di abitazioni, uffici, scuole o altri spazi indoor.

La qualità dell'aria interna (Indoor Air Quality, IAQ) è un aspetto cruciale della IEQ. Essa si riferisce specificamente alla qualità dell'aria negli ambienti interni e influisce direttamente sul benessere degli occupanti. Quando si progettano sistemi HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) per edifici residenziali, scuole, uffici o edifici commerciali devono essere pensati non solo per soddisfare le esigenze di riscaldamento e raffreddamento, ma anche per garantire una ventilazione adeguata, una corretta filtrazione dell'aria e una gestione efficiente dell'umidità. Questo approccio è essenziale per prevenire problemi di salute legati all'aria di scarsa qualità e per garantire un ambiente interno che favorisca il benessere e la produttività.

Questo lavoro rientra nel progetto VITALITY "WP2. People-centric sustainable buildings", finanziato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, al quale partecipa anche l'Università Politecnica delle Marche. L'obiettivo principale del progetto è sviluppare soluzioni innovative per l'edilizia scolastica, concentrandosi sul benessere degli utenti e promuovendo interattività e multifunzionalità.

Questa tesi ha come filone principale lo studio delle condizioni di comfort all'interno degli ambienti scolastici. La rilevanza della IEQ è particolarmente evidente negli edifici scolastici, che svolgono un ruolo cruciale nella vita di bambini e ragazzi. Le scuole ospitano un numero di occupanti per unità di superficie significativamente superiore rispetto ad altri edifici, come gli uffici, e i bambini sono più vulnerabili agli inquinanti indoor. Questo comporta rischi potenziali per il loro sviluppo polmonare e la salute respiratoria, rendendo essenziale garantire ambienti scolastici salubri. I bambini, infatti, trascorrono gran parte della loro giornata all'interno delle aule scolastiche.

Una progettazione adeguata degli spazi scolastici può avere un impatto significativo non solo sul comfort fisico degli studenti, ma anche sulla loro performance educativa e sul loro benessere generale. Per raggiungere questi obiettivi, il progetto ha adottato tecniche avanzate per la creazione di mappe tridimensionali del comfort, offrendo una visione dettagliata e immediata delle condizioni microclimatiche all'interno delle aule scolastiche.

Basandosi su una ricerca precedente che ha analizzato un campione rappresentativo di scuole nel database della Regione Marche, il progetto di monitoraggio, per la definizione dei parametri ambientali relativi al comfort termico e alla qualità dell'aria, è stato implementato utilizzando una test room nel dipartimento DIISM dell'Università Politecnica delle Marche. La test room, o camera climatica, è stata utilizzata per valutare il comfort ambientale nelle condizioni più sfavorevoli, ovvero durante la stagione invernale. I dati raccolti durante il progetto di monitoraggio sono stati elaborati e rielaborati attraverso Mappe del Comfort, per una lettura immediata e approfondita delle condizioni termo-igrometriche dell'ambiente scolastico. I risultati ottenuti sono stati confrontati con la normativa vigente e la letteratura più recente per verificarne la rispondenza, l'accuratezza e identificare eventuali aree di miglioramento future.

Questa tesi non si è posta solo l'obiettivo di migliorare le condizioni di comfort nelle scuole, ma anche quello di contribuire alla più ampia disciplina della progettazione sostenibile e innovativa degli edifici, per la configurazione dell'intero sistema nell'ambito del progetto VITALITY, evidenziando l'importanza di un approccio integrato alla qualità ambientale interna.

Come precedentemente detto, l'IEQ si basa su quattro differenti fattori quali quello termico, quello acustico, quello visivo e quello della qualità dell'aria mentre recenti studi scientifici evidenziano una maggiore influenza da parte di due di essi: Comfort Termico e Qualità dell'Aria Interna (IAQ).

Gli studenti trascorrono fino al 12% del loro tempo in aule scolastiche, superando qualsiasi altro ambiente tranne la casa. Questo ha portato a una crescente consapevolezza dell'importanza di una buona IAQ e comfort termico nelle scuole, poiché entrambi sono essenziali per le prestazioni di apprendimento e la concentrazione degli studenti.

L'importanza della qualità dell'IEQ è particolarmente evidente negli edifici scolastici, che spesso presentano un elevato numero di occupanti per unità di superficie e condizioni edilizie che possono influenzare negativamente il comfort. Molti edifici sono datati, mal mantenuti o recentemente ristrutturati con priorità all'efficienza energetica a scapito della qualità

dell'ambiente interno (IEQ). Le scuole più vecchie, specialmente quelle costruite più di 50 anni fa presentano problemi riconducibili a ponti termici, cattivo isolamento, infiltrazioni d'acqua, proliferazione di muffe. L'IAQ è particolarmente critica in queste strutture, spesso sovraffollate e mal ventilate. Una corretta ventilazione è fondamentale per ridurre le fonti di inquinamento e migliorare la qualità dell'aria interna.

Il comfort termico è un altro aspetto cruciale nella valutazione dell'IEQ. La percezione del comfort termico dipende da una serie di fattori, tra cui l'età degli studenti, la zona climatica e la modalità operativa degli impianti di riscaldamento e raffreddamento. I modelli di comfort termico, come il metodo razionale di Fanger [1] e il comfort adattivo [2], sebbene ampiamente utilizzati, presentano alcune limitazioni quando applicati a contesti specifici come le aule scolastiche e i bambini. Pertanto, è fondamentale considerare le caratteristiche uniche degli spazi scolastici e delle loro utenze per ottimizzare le condizioni ambientali.

Una buona IEQ negli edifici scolastici non solo migliora il benessere degli studenti, ma può anche portare a migliori risultati educativi, riducendo l'assenteismo e migliorando la concentrazione e l'apprendimento.

1. STATO DELL'ARTE

Viviamo in quella che viene definita "Generazione Indoor", con ricerche come quelle di YouGov [3] che indicano che trascorriamo circa il 90% del nostro tempo in ambienti chiusi, ovvero circa 22 ore al giorno. Gli studenti, in particolare, passano circa il 12% del loro tempo in classe, rendendo le scuole il secondo ambiente più frequentato dopo le abitazioni. Questa realtà sottolinea l'importanza di garantire un'aria interna di qualità e un comfort termico adeguato nelle scuole, elementi fondamentali per il rendimento scolastico e la concentrazione degli studenti.

L'Indice di Qualità Ambientale Interna (IEQ) è un parametro fondamentale per valutare la qualità degli ambienti chiusi, prendendo in considerazione quattro aspetti fondamentali: comfort termico, acustica, illuminazione e qualità dell'aria. Tuttavia, studi recenti hanno dimostrato che il comfort termico e la qualità dell'aria interna (IAQ) hanno un impatto molto più significativo sul benessere e la produttività delle persone.

Tra i vari fattori che contribuiscono al miglioramento della IAQ nelle scuole, un elemento cardine, che può assicurare una qualità interna e un comfort termico nelle scuole, è sicuramente la trasmittanza termica dei vetri installati in esse. Ad esempio, uno studio di Mamdooh Alwetaishi [4] ha criticamente esaminato vari aspetti che influenzano la IAQ nelle scuole, suggerendo che miglioramenti nelle pratiche di ventilazione possono portare a significativi benefici per la salute degli studenti. Lo studio enfatizza l'importanza di monitorare continuamente la IAQ e di implementare sistemi di ventilazione adeguati. Inoltre, esamina l'impatto del rapporto tra vetratura e pareti in diversi climi, utilizzando la modellazione TAS EDSL [5], convalidata da studi sul campo. È stato esaminato il rapporto ottimale di vetratura, variando tra il 5% e il 40%. Si è scoperto che, per climi caldi, sia secchi che umidi, è consigliabile un rapporto vetro/parete del 10%, poiché le facciate sud ed est accumulano più calore. La trasmittanza termica è un elemento cruciale che influenza sia la perdita che il guadagno di calore negli edifici. In letteratura, gli archetipi sono stati spesso utilizzati per la ricerca e definizione dei tipi di vetrate in termini di trasmittanza [6][7][8].

Un altro punto chiave per il raggiungimento di un comfort termico ottimale è il mantenimento di un ambiente ben ventilato. A tal proposito, Sasan Sadrizadeh et al. [9] hanno riscontrato che, a causa degli elevati tassi di occupazione nelle scuole, è essenziale dotare le aule di sistemi di ventilazione in grado di fornire aria esterna alla zona di respirazione. Le strategie di ventilazione possono essere classificate come ventilazione naturale, meccanica (flusso unidirezionale e bidirezionale) o ibrida, quest'ultima rappresentando una combinazione di sistemi progettati per fornire agli spazi interni aria esterna filtrata. Un sistema di ventilazione ibrido adeguatamente controllato può fornire una ventilazione adeguata e ridurre efficacemente le concentrazioni di alcuni inquinanti generati all'interno.

Numerosi studi sono stati condotti a livello globale che evidenziano l'importanza di sistemi di ventilazione efficienti.

Ad esempio, Shamila Haddad et al. [10] ha sottolineato l'importanza del sistema di ventilazione per il miglioramento della qualità dell'aria interna. Questo studio dimostra come i bambini delle scuole secondarie a Sydney, in Australia, in un clima subtropicale umido, si sentano termicamente a loro agio in un intervallo di temperatura interna di 20,4 - 27,0 °C, corrispondente a sensazioni termiche medie tra - 0,85 e + 0,85 (limiti inferiore e superiore per il 20% di insoddisfazione). Si è trovata una temperatura neutra di 23,7 °C e 22,6 °C rispettivamente durante l'estate e l'inverno, con una preferenza degli studenti per una sensazione più fresca rispetto a quella neutra. Un precedente studio sul comfort termico nelle aule scolastiche del NSW ha trovato una temperatura operativa interna neutra estiva e preferita di 22,5 °C, che è più fresca di quanto previsto per gli adulti nelle stesse condizioni termiche [11].

Inoltre, a Singapore, grazie allo studio di Chao Cen et al. [12], è stato misurato l'ambiente termico dell'aula, valutato il comfort termico degli studenti, monitorate le risposte fisiologiche e valutate le prestazioni cognitive degli studenti in diverse aule con varie configurazioni di ventole. I risultati dell'indagine sul comfort termico hanno indicato che il comfort termico degli studenti può essere mantenuto a livello neutro con una velocità dell'aria elevata, quando la temperatura dell'aula rimane uguale o inferiore a 30 °C.

Un recentissimo studio, condotto anch'esso in ambienti di prova, ha analizzato come l'asimmetria radiante incida sulle condizioni di comfort termico e il benessere degli occupanti. Lo studio di Marco Marigo et al. [13] ha analizzato il disagio causato dall'asimmetria radiante negli ambienti indoor. In particolare, utilizzando una sala prove, sono stati studiati diversi scenari che rappresentano ambienti indoor realistici con pannelli radianti utilizzati per il riscaldamento e superfici di dissipazione del calore in diverse posizioni. Sono state considerate configurazioni con parete o soffitto riscaldati e la contemporanea presenza di una o più superfici dissipatrici di calore. Sono stati analizzati dodici scenari che rappresentano situazioni reali di edifici. Questo approccio, in cui le persone vengono testate in ambienti controllati asimmetrici realistici piuttosto che in ambienti uniformi con superfici calde o fredde, ha corrispondenze limitate in letteratura.

Garantire una qualità dell'aria interna e un comfort termico ottimali nelle scuole è essenziale per il benessere e il rendimento degli studenti. Studi recenti evidenziano l'importanza di pratiche di ventilazione adeguate, della corretta gestione della trasmittanza termica dei vetri e della considerazione dell'asimmetria radiante negli ambienti indoor. Questi elementi non solo migliorano la qualità dell'aria e il comfort termico, ma sono anche fondamentali per creare un ambiente di apprendimento sano e produttivo.

2. OBIETTIVI

Il comfort termico e la qualità dell'aria interna (Indoor Air Quality, IAQ) nelle aule scolastiche rappresentano i principali focus della nostra ricerca e, allo stesso tempo, elementi fondamentali per il benessere della e la salute degli individui. Questi elementi sono cruciali non solo per garantire un ambiente di apprendimento sano e produttivo, ma anche per prevenire problematiche legate alla salute e migliorare la qualità della vita all'interno degli edifici scolastici.

L'Indice di Qualità Ambientale Interna (Indoor Environmental Quality, IEQ) è una misura composita che valuta quattro fattori principali: il comfort termico, acustica, illuminazione e la qualità dell'aria interna. Tuttavia, recenti studi scientifici hanno evidenziato che due di questi parametri, ovvero il comfort termico e l'IAQ, influenzano in misura considerevolmente maggiore il benessere e la produttività degli ambienti interni rispetto agli altri due fattori.

Gli studenti trascorrono fino al 12% del loro tempo nelle aule scolastiche, le quali, pertanto, rappresentano il secondo ambiente più significativo dopo la propria abitazione. Questa consapevolezza ha sottolineato l'importanza di un'IAQ ottimale e del comfort termico nelle scuole, essenziali per il rendimento accademico e la concentrazione degli studenti.

La valutazione accurata dell'IEQ negli edifici scolastici riveste un ruolo fondamentale, specialmente alla luce dello stato spesso inadeguato del parco edilizio scolastico italiano. Molti edifici scolastici sono datati, mal mantenuti o ristrutturati con un'enfasi prevalente sull'efficienza energetica, spesso a discapito della qualità ambientale interna. Circa il 40% degli edifici scolastici in Italia è stato costruito più di 50 anni fa e presenta problematiche quali ponti termici, scarsa coibentazione, infiltrazioni d'acqua e proliferazione di muffe. Questi fattori compromettono la qualità dell'aria interna particolarmente critica in strutture sovraffollate e mal ventilate.

La ventilazione appropriata è fondamentale per mitigare le fonti di inquinamento indoor e migliorare la qualità dell'aria interna nelle scuole. Inoltre, il comfort termico riveste un ruolo fondamentale nella percezione del benessere ambientale: tale percezione è influenzata da una varietà di fattori, inclusi l'età degli studenti, la zona climatica e le modalità di funzionamento degli impianti di climatizzazione. Eppure, i modelli di comfort termico più comunemente adottati, come il metodo razionale di Fanger [1] e il concetto di comfort adattivo, che sono stati originariamente sviluppati per adulti, presentano limitazioni quando applicati a bambini e adolescenti, a causa delle loro specifiche esigenze fisiologiche. È pertanto necessario sviluppare modelli più appropriati per questa fascia di età.

Nel contesto della nostra ricerca, è essenziale bilanciare la creazione di ambienti scolastici ottimali con la riduzione del consumo energetico, in modo da garantire non solo un ambiente di apprendimento favorevole ma anche sostenibile dal punto di vista ecologico.

Negli ambienti scolastici esiste una complessa interazione tra la presenza e il tipo di superfici vetrate, le modalità di ventilazione (naturale e/o meccanica), le dimensioni e la configurazione

dell'aula e la disposizione dei banchi. Studiare come questi vari elementi interagiscono tra loro permette di monitorare e valutare le diverse situazioni di comfort e dis-comfort all'interno dell'aula.

Nell'ambito della ricerca di questa tesi, abbiamo esaminato dettagliatamente come questi fattori influenzano le condizioni all'interno delle aule, al fine di individuare le aree più critiche all'interno dell'aula. In molti casi, tali aree corrispondono a punti adiacenti alle finestre, in prossimità della posizione delle bocchette di ricircolo dell'aria per ventilazione meccanica.

I risultati sono stati ottenuti tramite prove sperimentali condotte nella test room, ed hanno coinvolto vari scenari di riscaldamento, ventilazione e trasmittanza del vetro, con l'obiettivo di analizzare l'impatto del sistema di ventilazione meccanica e la velocità di ricambio d'aria. Queste prove hanno prodotto mappe termiche, mappe di velocità dell'aria e mappe di comfort della simmetria radiante, permettendo di individuare graficamente le zone più critiche e la ricorrenza di caratteristiche frequenti.

Questi risultati sono destinati a fornire indicazioni concrete per guidare la progettazione futura dei nuovi ambienti scolastici, con l'obiettivo primario di creare condizioni ambientali ottimali per il benessere degli studenti e per garantire un apprendimento efficace. Le informazioni ottenute dalle nostre indagini e le analisi approfondite dei vari parametri ambientali, come la distribuzione della temperatura, la qualità dell'aria e la velocità dell'aria, sono fondamentali per sviluppare strategie di progettazione e intervento che rispondano in modo mirato alle problematiche riscontrate.

Investire in ambienti scolastici di alta qualità è un passo fondamentale verso la costruzione di un futuro migliore per le prossime generazioni, poiché studenti che apprendono in condizioni ottimali sono più propensi a eccellere e a sviluppare competenze che li preparano per le sfide future.

La nostra ricerca mira a fornire le basi per progettare scuole che siano non solo efficienti dal punto di vista energetico, ma anche salutarie e confortevoli per tutti gli occupanti, contribuendo così a un miglioramento complessivo del sistema educativo e della qualità della vita.

3.METODOLOGIA

3.1 Il caso di riferimento: la classe campione

La normativa in materia di conformazione planimetrica e strutturale degli edifici scolastici indica che le aule devono avere una superficie minima pari ad almeno 50 m² e un'altezza utile di 3 m. Questi due vincoli, uniti a considerazioni sull'ergonomia, fanno sì che l'unica variante possibile sia il rapporto dimensionale tra i due lati della pianta.

Dunque, alla luce di quanto sopra e a seguito dell'Analisi Tipologica svolta all'interno di una precedente ricerca di tesi sulle planimetrie di 6 plessi scolastici della Regione Marche, si sono individuate 3 categorie di aule. Queste ultime sono state determinate in funzione delle dimensioni di lunghezza e larghezza e risultano le seguenti:

- aule quadrate, con aperture su uno dei due lati;
- aule larghe, con aperture sul lato di maggiore lunghezza;
- aule profonde, con aperture sul lato di minore lunghezza.

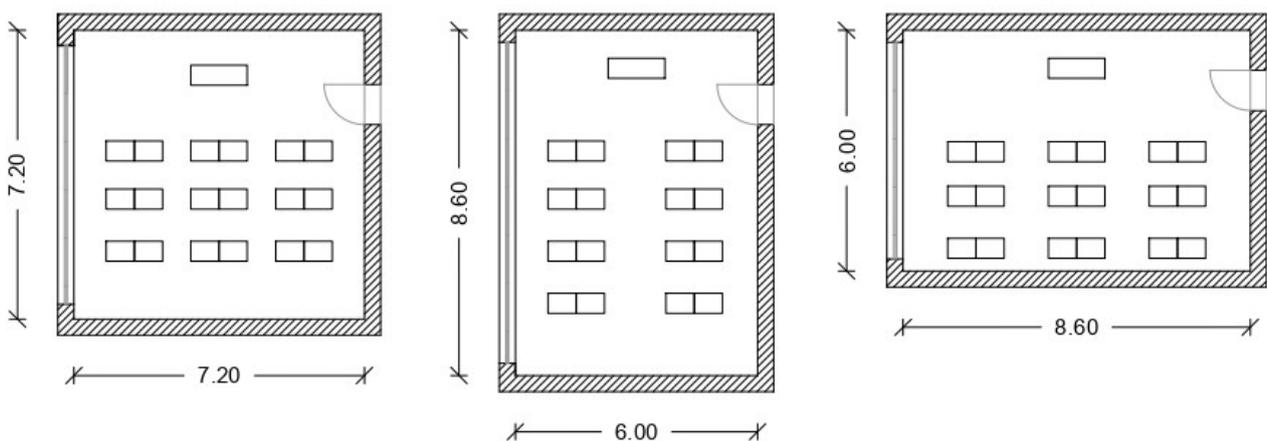


Fig.1. Tipologie di aule scolastiche: aule quadrate (a sinistra), larghe (al centro) e profonde (a destra).

L'analisi ha inoltre portato all'individuazione dello spazio interno delle aule in zone che, a prescindere dalla conformazione dell'aula, riportano le stesse caratteristiche. Le zone sono state così classificate e descritte:

zona 1: in genere ha dimensione in altezza di circa 2.60 m e in larghezza varia in base alla dimensione dell'aula. In genere quest'area è riservata al docente e vi troviamo la cattedra ma non i banchi degli studenti. Nella maggior parte dei casi il lato di 2.60 m è a contatto con l'ambiente esterno (e riporta dunque delle aperture) mentre il lato più lungo e di dimensione variabile si rapporta con un altro ambiente (es. un'altra aula) o con il contesto esterno;

zona 2: sottraendo l'area della zona 1 all'area complessiva dell'aula, ottengo una superficie che verrà a sua volta suddivisa in due parti uguali e in genere di forma rettangolare dai rapporti variabili: la zona 2 e la zona 3. La zona 2, in particolare, ha il lato lungo finestrato (dunque a contatto con l'esterno), il lato corto con funzione di muro divisorio o perimetrale e ospita parte dei banchi degli studenti.

zona 3: ha le stesse caratteristiche dimensionali e del lato corto (con funzione di muro divisorio o perimetrale) della zona 2 precedentemente descritta ma, a differenza di quest'ultima, presenta il lato lungo a contatto con il corridoio che porta alle varie aule. Anche la zona 3 ospita i banchi degli studenti.

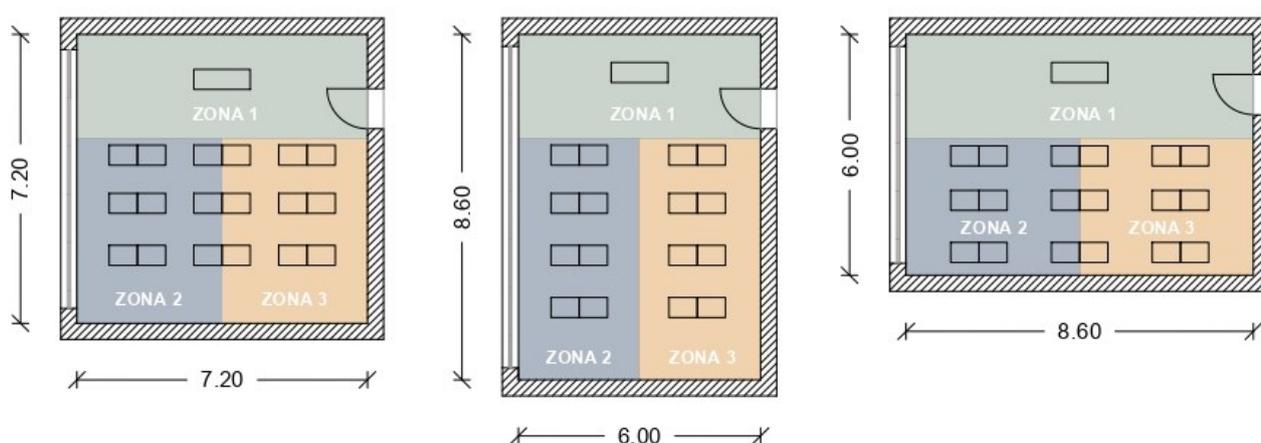


Fig.2. Zone omogenee individuate all'interno delle aule quadrate, larghe e profonde.

L'ipotesi alla base del nostro studio assume che le 3 zone, delimitate da finestrate, pareti perimetrali o divisori interni, siano soggette a condizioni climatiche diverse fra loro ma omogenee all'interno della stessa area e per questo analizzabili in modo diverso a seconda delle loro caratteristiche dimensionali e di delimitazione.

In una valutazione del comfort termico, le zone che riportano condizioni più favorevoli sembrano essere la n. 1 e n. 3. La zona n. 2 sembra invece essere quella più sfavorevole in termini di condizioni termiche: essa risulta più influenzata e a stretto contatto con le condizioni climatiche esterne, conseguenza della presenza di un'ampia superficie finestrata.

In particolare, per quanto riguarda la superficie finestrata, emergono alcuni dati costanti al variare della forma dell'aula: le aule quadrate riportano, nella maggior parte dei casi, una percentuale finestrata pari al 40%, le aule larghe pari al 35% mentre quelle profonde si aggirano intorno al 50%.

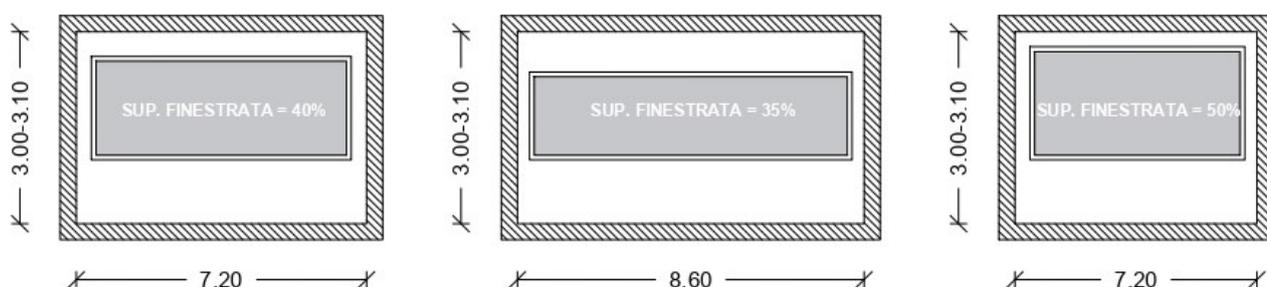


Fig.3. Percentuale di superficie finestrata in funzione della tipologia di aula quadrata, larga e profonda.

L'Analisi tipologica sopra riportata ci ha permesso di catalogare delle aule di riferimento da cui estrarre i dati necessari (dimensioni, percentuale di superficie finestrata...) ed è stata il punto di partenza per il progetto di monitoraggio e per lo studio della IEQ – Qualità Ambientale Interna.

3.2 Il caso studio: la Test-Room (o camera climatica)

Per una corretta e confortevole valutazione del comfort termico all'interno delle aule, si è proceduto con la simulazione dell'ambiente scolastico attraverso l'allestimento di una test-room, o camera climatica.

Il vantaggio della test-room è quello di essere capace di ottenere risultati attendibili e coerenti seppur le misurazioni non siano state fatte nelle aule in questione.

La camera climatica, che di seguito chiameremo Test-room, utilizzata per questa tesi si trova all'interno del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche.

Lo strumento in questione ha dimensioni interne di 4,40 metri in larghezza e 3,40 m in profondità per un'area di circa 15 m². L'altezza utile è pari a 2,70 m. La camera presenta una porta di accesso di 0,90 m su uno dei lati lunghi.

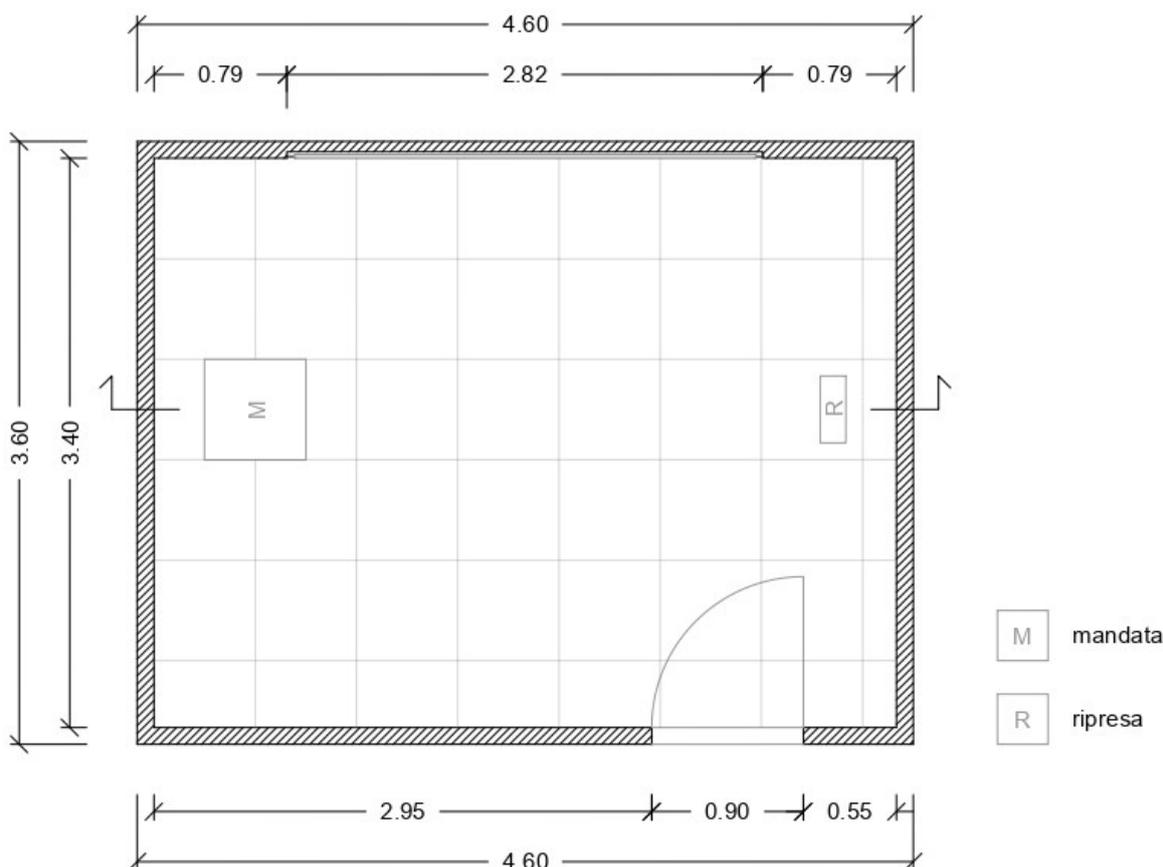


Fig.4. *Pianta della test-room.*

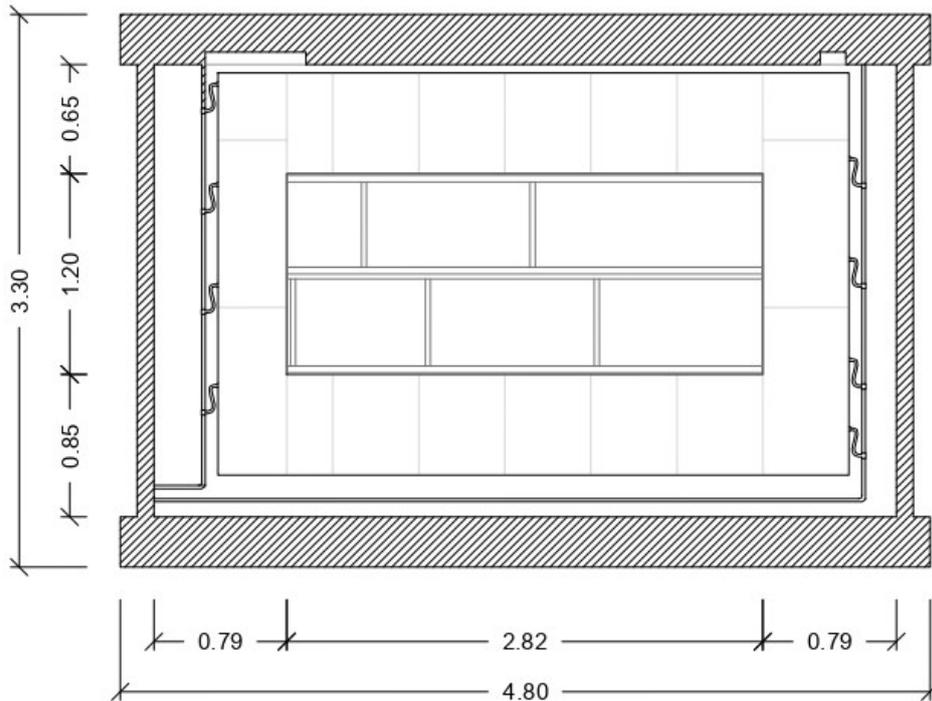


Fig.5. Sezione della test-room.

Le pareti della camera climatica sono composte da pannelli prefabbricati in polistirene estruso e cartongesso per uno spessore di 20 cm (5 + 15).

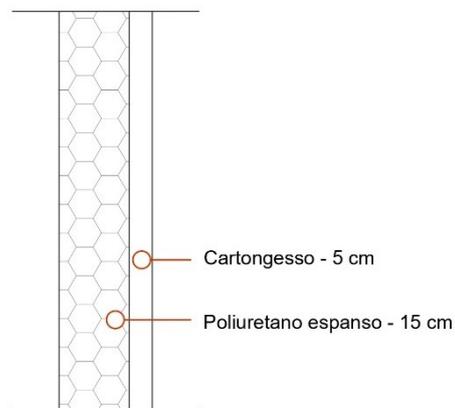


Fig.6. Stratigrafia delle pareti della test-room.

Su una delle quattro pareti della test-room sono posizionati dei pannelli radianti che ne consentono il riscaldamento o il raffrescamento a seconda della prova da condurre. Sulla parete corrispondente al lato lungo opposto alla porta di ingresso i pannelli radianti sono 4 e hanno dimensioni pari a 3,75 m in lunghezza e 0,60 m in altezza.

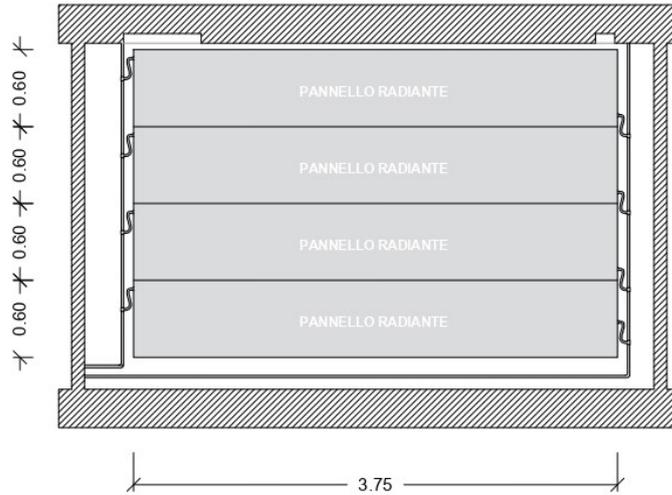


Fig.7. Sezione del lato della test-room con pannelli radianti.

Il soffitto della Test-room alloggia pannelli acustici e da controsoffitto in fibra minerale grazie ad una struttura metallica. I pannelli, posti in modo alternato, hanno dimensioni modulari di 0,60 m x 0,60 m. Nel soffitto sono presenti anche un diffusore ad effetto elicoidale per la mandata d'aria e un diffusore ad effetto elicoidale con griglia per la ripresa dell'aria. Il primo è posto a circa 1,90 m dalla parete con le aperture e a 1,30 m dalla parete divisoria mentre il secondo è stato posizionando considerando una debita distanza dal diffusore di mandata.

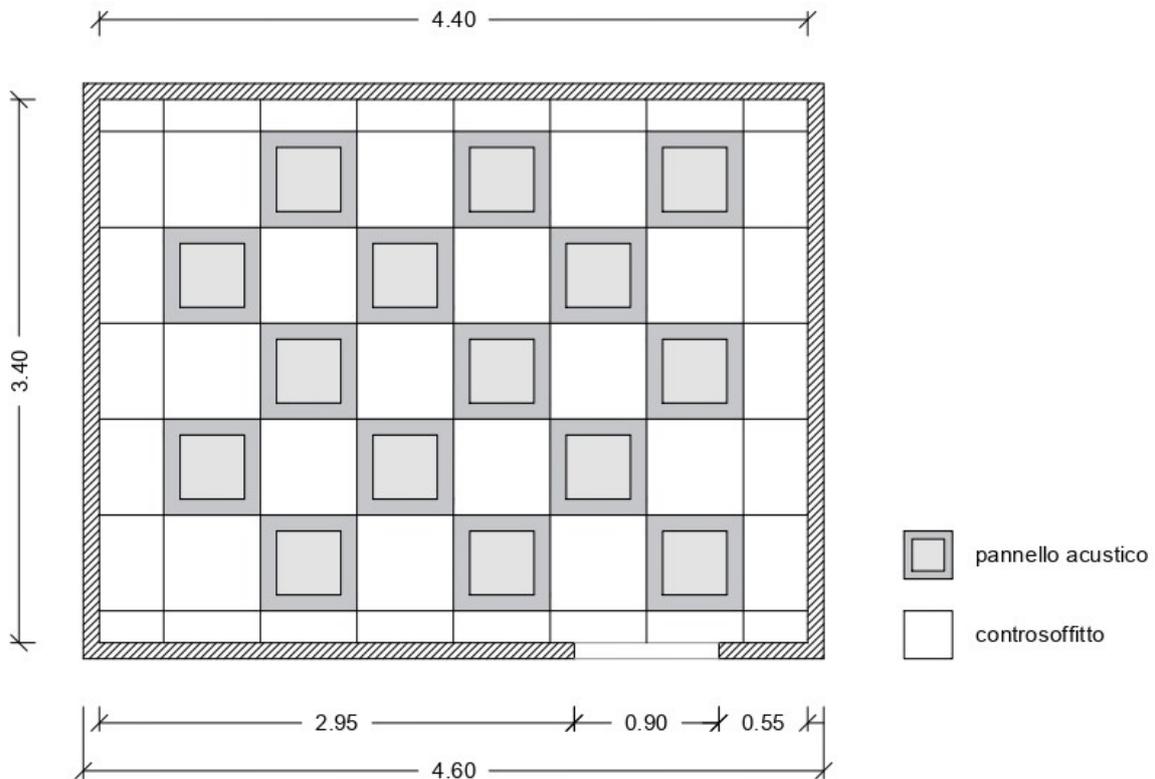


Fig.8. Pianta del controsoffitto della test-room.

3.3 Monitoraggio della Test-Room: i metodi

Nel caso in esame, la camera climatica ricrea e simula la zona 2 di un'aula tipo, ovvero quella maggiormente sottoposta a condizioni termiche sfavorevoli. Come detto in precedenza, questa situazione è dovuta al lato più lungo caratterizzato dalla presenza di abbondanti superfici finestate e quindi ad un'esposizione maggiore alle condizioni climatiche esterne.

Il monitoraggio fornirà una mappatura completa dell'andamento dei parametri ambientali dell'area in esame in ogni sua parte a diverse altezze di presa. L'obiettivo è quello di conoscere tutti i parametri ambientali e fisici in tutte le zone della test-room.

Lo strumento di monitoraggio utilizzato prende il nome di ComfortSense Dantec ed è in grado di registrare i seguenti fattori ambientali e fisici:

- temperatura interna (C°)
- tasso di umidità relativa (%)
- velocità dell'aria (m/s)
- draught rate (%)
- intensità di turbolenza
- temperatura operativa (C°)
- metabolismo (met)
- resistenza termica degli indumenti (clo)
- voto medio previsto (PMV)
- percentuale di insoddisfatti (PPD)

3.3.1 L'allestimento della Test-Room

La valutazione del Comfort Termico è stata effettuata attraverso un progetto di monitoraggio calibrato ed eseguito all'interno della Test-Room descritta in precedenza.

Per la valutazione dell'IEQ (Qualità Ambientale Interna) si sono monitorate le condizioni di Comfort e dis-Comfort termico ricreano le condizioni a cui gli studenti sono sottoposti durante il periodo invernale all'interno delle aule scolastiche. L'inverno risulta infatti essere la condizione termica più sfavorevole per coloro che occupano gli ambienti scolastici.

La camera climatica è stata allestita attraverso l'impiego di materiali e apparecchiature specifiche. Le dimensioni dell'infisso sono state calcolate assumendo un rapporto pari al 40% rispetto alla superficie della parete su cui esso è posto. Tale percentuale è stata scelta in quanto

si avvicina molto a quella riscontrata mediamente nelle aule di forma quadrata durante la precedente analisi tipologica (di cui prima).

Il rapporto tra le dimensioni della finestra non è stato tenuto in considerazione in quanto non rilevante ai fini del monitoraggio. Un aspetto invece non trascurabile è quello legato alle prestazioni termiche del vetro dell'infisso da simulare. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto ci sono due fattori da tenere in considerazione in quanto da essi dipende la temperatura superficiale della finestra soprattutto durante il regime invernale. Le due caratteristiche fondamentali sono:

- temperatura esterna di progetto (UNI 5364)
- trasmittanza della superficie vetrata

La temperatura esterna di progetto dipende dall'area geografica in cui assumiamo di trovarci e, più nello specifico, dalla provincia presa in considerazione. La trasmittanza della superficie vetrata è strettamente legata alla tipologia di serramento e dunque alle caratteristiche del suo vetro che può essere singolo, doppio o triplo.

La temperatura superficiale della finestra risulta essere un dato fondamentale in quanto corrisponderà alla temperatura impostata per i pannelli radianti che andranno dunque a simulare il regime invernale.

Questa tesi andrà ad analizzare diverse temperature superficiali ottenute attraverso l'uso, simulato, di diverse tipologie di vetro (U_w1 , U_w3 , U_w5).

La formula utilizzata per ottenere il valore della temperatura superficiale nei vari casi è stata la seguente:

$$T_{si} = T_i - U \times R_{si} \times \Delta T$$

I fattori tenuti in considerazione sono descritti di seguito:

- temperatura interna (T_i), con valori di 20 +/- 2°C (DM 18/12/1975 – Ambienti scolastici)
- temperatura esterna di progetto (T_e), valore pari a -2 °C (UNI 5364 – Provincia di Ancona)
- resistenza superficiale interna (R_{si})
- trasmittanza delle finestre (U_w), in base alla tipologia di vetro preso in considerazione.

In tutti i casi analizzati, i pannelli radianti posti sul lato lungo a simulare la parete finestrata, dovranno raggiungere una temperatura pari alla T_{si} derivante dalle variabili dello specifico caso (R_{si} e U_w). I pannelli posti sul lato corto rimarranno invece spenti a simulare la parete divisoria tra le aule. Per far sì che i pannelli raggiungano la temperatura superficiale necessaria al monitoraggio, si fa uso del Bagno Termostatico che ha funzione di riscaldamento o, come nel nostro caso, di raffrescamento dell'acqua che scorre all'interno dei pannelli radianti.

Tuttavia, come nominato in precedenza, la superficie finestrata presa in considerazione deve essere pari al 40% della superficie totale della parete. Questo fa sì che il restante 60% della parete deve, di fatto, simulare il muro perimetrale dell'aula

Il sistema della camera climatica, però, non permette di attivare solo parte dei pannelli posti lungo la parete lunga (lasciandone dunque alcuni spenti) e per questo motivo si sono dovute adottare delle specifiche tecniche. Infatti, al fine di simulare due superfici diverse (vetro e parete perimetrale in forati) a due diverse temperature superficiali differenti, si sono rivestiti parte dei pannelli con materiale isolante. Le caratteristiche specifiche di quest'ultimo sono state valutate tenendo in considerazione il valore della Trasmittanza tipica (U_p) delle pareti prese in esame.

Per l'isolamento, sono stati scelti pannelli di poliestere espanso con uno spessore di 2 cm e una conducibilità termica di $0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Le dimensioni dei pannelli, 100 cm di lunghezza e 50 cm di larghezza, sono state determinate in base alle dimensioni standard disponibili sul mercato. La temperatura superficiale dei pannelli in polistirolo (T_{s_p}) è risultata essere $17,05 \text{ }^\circ\text{C}$, calcolata utilizzando la formula specifica per T_{s_i} indicata in precedenza.

Tenendo in considerazione tutte le precedenti considerazioni teoriche, si è poi proceduto all'allestimento, pratico, della camera climatica: la parete lunga è stata ricoperta con pannelli in poliestere per una superficie pari a 6 m^2 mentre delle sonde sono state posizionate sopra i pannelli per monitorare la temperatura superficiale durante tutte le fasi di prova.



Fig.9. Foto allestimento parete lunga Test-Room con pannelli in polistirene espanso.

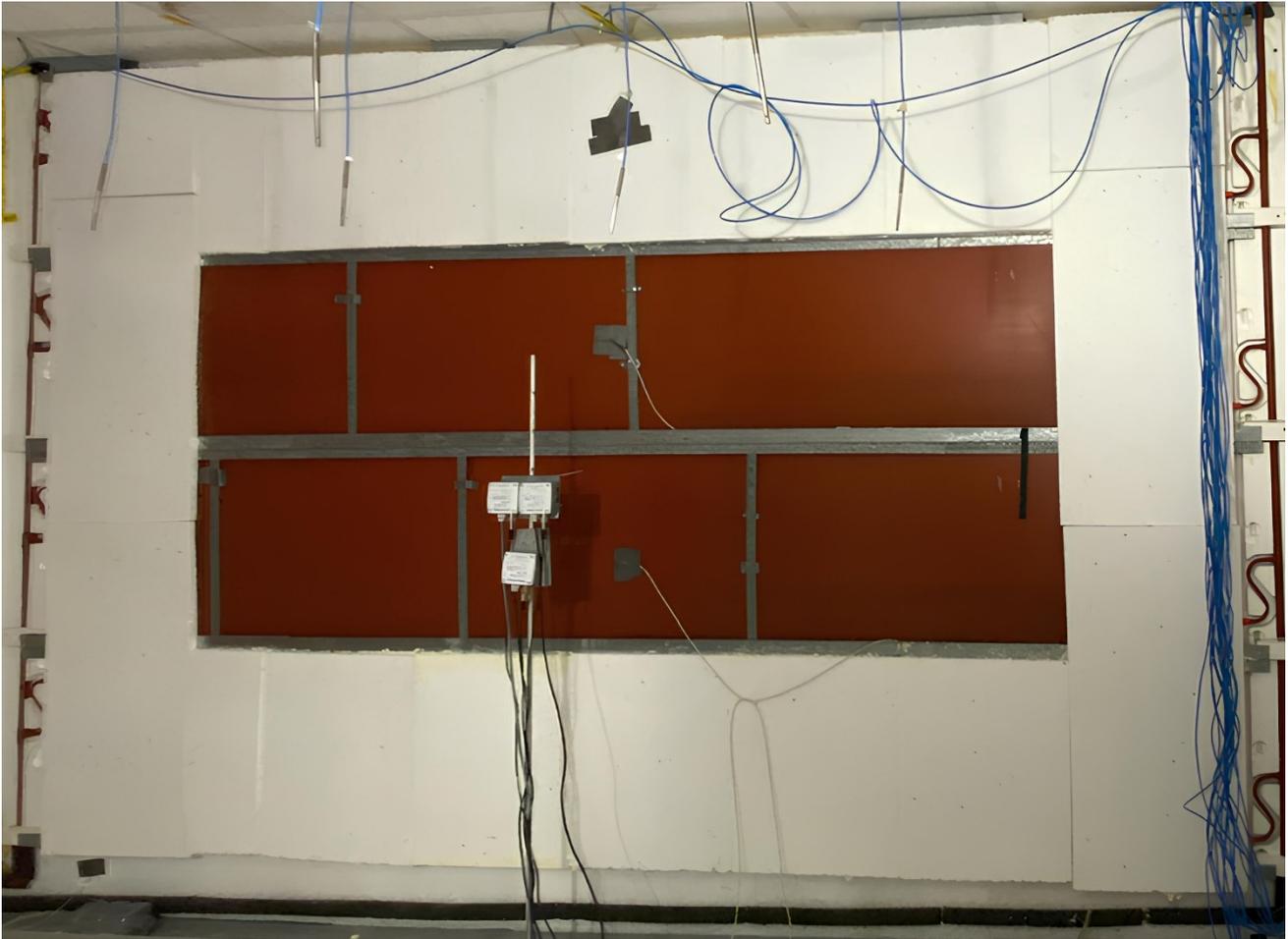


Fig.10. Parete lunga test-room allestita.

Il sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC), comunemente utilizzato nelle aule, è stato simulato mediante l'installazione di un diffusore ad effetto elicoidale per l'immissione dell'aria (Fig. 12) e di una griglia per la ripresa dell'aria (Fig.13), posizionata a una distanza adeguata dal diffusore di mandata. Questi due componenti, fondamentali per determinare la portata d'aria, sono stati integrati sostituendo due pannelli del soffitto.

Per garantire una portata d'aria ottimale durante le prove, si è fatto riferimento ai limiti normativi stabiliti dal Decreto Ministeriale del 18/12/1975. Tale normativa disciplina la portata d'aria esterna da assicurare tramite ventilazione naturale e/o meccanica, in funzione della destinazione d'uso dell'ambiente considerato. Le portate d'aria sono indicate attraverso coefficienti di ricambio, calcolati come il rapporto tra il volume d'aria esterna immesso ogni ora e il volume complessivo dell'ambiente.

La simulazione ha permesso di valutare l'efficienza del sistema VMC nel garantire un ricambio d'aria adeguato, conforme alle normative vigenti. Questa valutazione è cruciale per assicurare che l'ambiente rimanga salubre e conforme agli standard di ventilazione necessari per l'uso specifico dell'aula.



Fig.11. *Diffusore elicoidale per la mandata d'aria.*



Fig.12. *Parete lunga test-room allestita.*

3.3.2 Il progetto di monitoraggio

Una volta conclusa la fase di allestimento, si è potuto procedere con il progetto di monitoraggio e lo studio del benessere degli occupanti.

Il target, dato in questo caso dagli studenti seduti ai banchi nella zona 2, ha definito i punti in cui verrà posizionata la strumentazione ComfortSense Dantec e le altezze significative alle quali raccogliere i dati.

Sono dunque stati identificati 13 punti di presa:

- i punti da 1 a 5 sono fissati ad una distanza di 60 cm parallelamente al lato lungo che simula la parete finestrata e hanno un interasse di 90 cm. Essi vanno a ricostruire le condizioni degli studenti seduti nella fila di banchi più vicina alla finestra;
- i punti da 6 a 10 si posizionano a 120 cm parallelamente al lato lungo e si trovano ad una distanza di 90 cm tra loro lungo l'asse y. Essi simulano la situazione della seconda fila di banchi;
- i punti 11, 12 e 13 sono posti perpendicolarmente al lato lungo ad una distanza di 210 cm rispetto all'asse y e hanno una distanza pari a 60 cm l'uno dall'altro lungo l'asse x. I tre punti in questione rappresentano lo stato degli studenti seduti nei banchi più lontani dalla finestra.



Fig.13. Pianta della test-room con individuazione dei punti di presa.

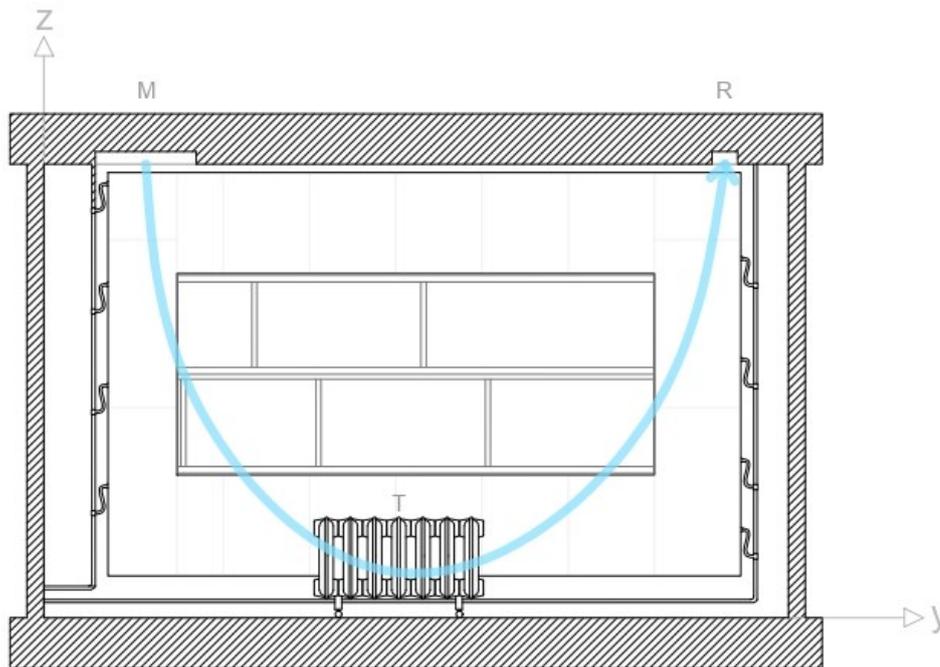


Fig.14. Sezione della test-room con flusso dell'aria tra mandata e ripresa.

Successivamente, sono stati impostati i parametri del bagno termico e di conseguenza dei pannelli radianti per ricreare una situazione il più possibile simile alla realtà.

Per garantire che i pannelli radianti riflettessero le trasmittanze termiche delle finestre, è stato utilizzato un bagno termostatico (Fig. 16). Il principio di funzionamento è semplice: il bagno termostatico mantiene costante la temperatura dell'acqua utilizzata per raffreddare i pannelli radianti. Questo permette ai pannelli di raggiungere e mantenere le temperature desiderate, garantendo la riproducibilità e l'affidabilità dei risultati sperimentali.

Il bagno termostatico è stato regolato su tre diverse temperature corrispondenti alle tre diverse trasmittanze termiche, come segue:

- 2,5 °C per una trasmittanza termica $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 10,0 °C per una trasmittanza termica $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 16,8 °C per una trasmittanza termica $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$

L'utilizzo di queste tre temperature consente di replicare condizioni termiche diverse, come quelle che si riscontrerebbero in presenza di finestre con diverse capacità isolanti.

Dopo qualche ora, circa due, dall'accensione del dispositivo i pannelli radianti, che simulano il vetro della finestra, raggiungono le temperature prefissate. e dal pannello di controllo della test-room si verifica che i parametri ambientali raggiungono i valori richiesti.

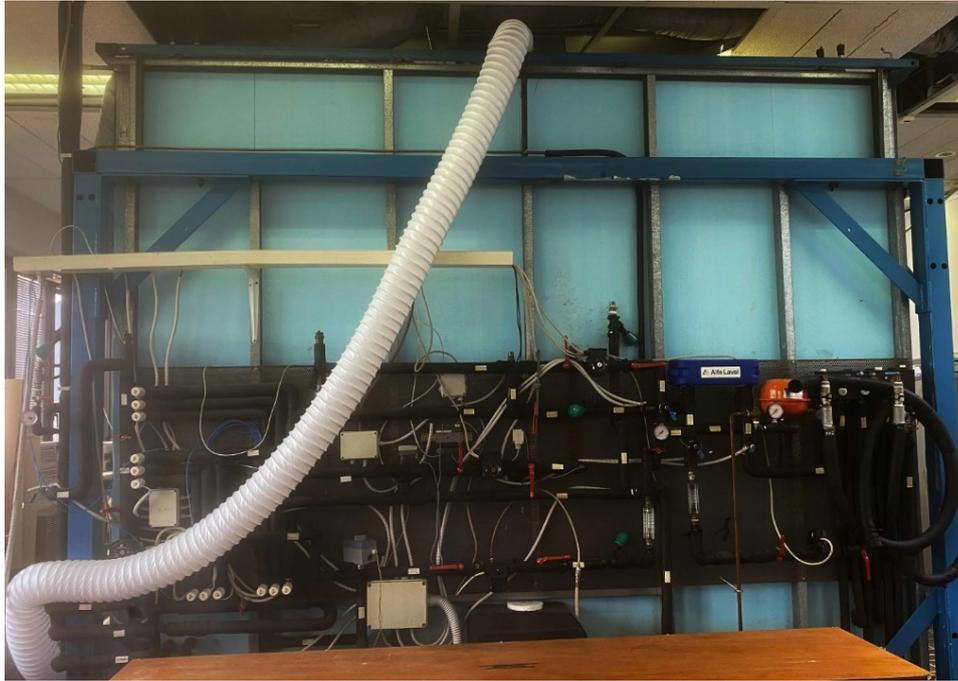


Fig.15. Foto del bagno termostatico.

Attraverso il pannello di controllo (Fig. 17) della camera climatica si verifica che i parametri ambientali raggiungano i valori richiesti:

1. Trasmittanza termica $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$:
 - Temperatura superficiale pannelli radianti: $5,7 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - Temperatura dell'aria: $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Bagno termostatico: $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$

2. Trasmittanza termica $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$:
 - Temperatura superficiale pannelli radianti: $11,4 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - Temperatura dell'aria: $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Bagno termostatico: $10 \text{ }^\circ\text{C}$

3. Trasmittanza termica $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$:
 - Temperatura superficiale pannelli radianti: $17,1 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - Temperatura dell'aria: $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Bagno termostatico: $16,8 \text{ }^\circ\text{C}$

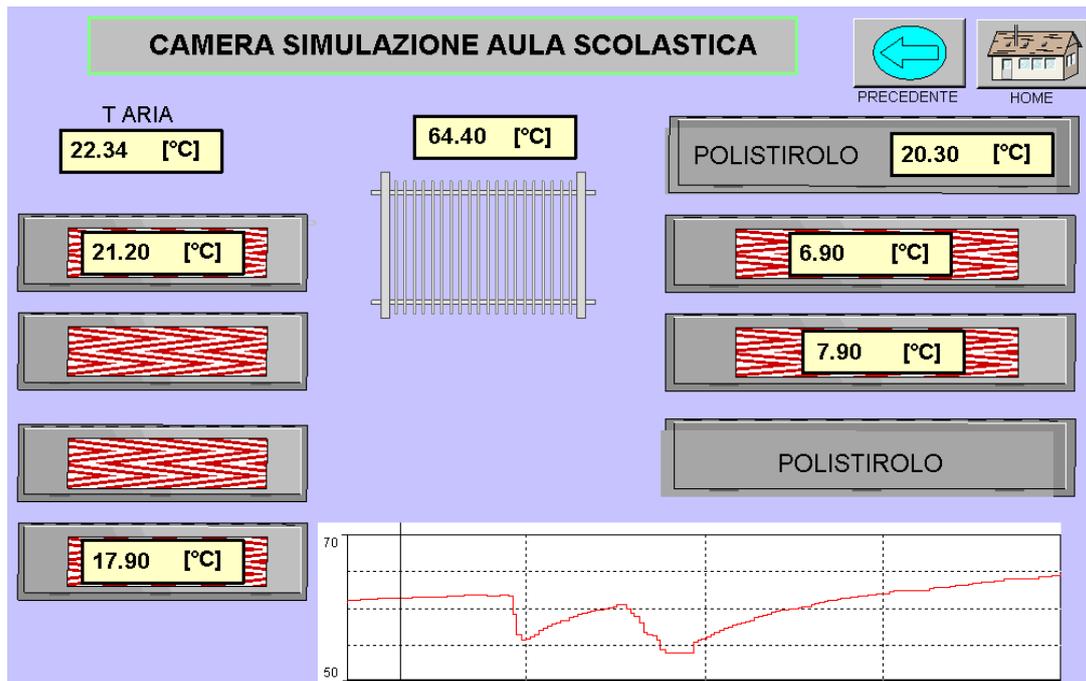


Fig.16. Screen del pannello di controllo per verifica dei parametri.

I pannelli radianti sono generalmente costituiti da una superficie piana o leggermente curva, all'interno della quale scorre un fluido, nel nostro caso acqua, che può essere riscaldato o raffreddato. La superficie esterna del pannello emette radiazione termica verso l'ambiente circostante, contribuendo così al riscaldamento o raffreddamento dell'area in cui è installato.

Quando si simulano le proprietà termiche di un vetro di finestra utilizzando pannelli radianti, è cruciale che questi ultimi replicano fedelmente le caratteristiche termiche del vetro specifico, in particolare la trasmittanza termica (U_w). Essa è un parametro fondamentale che misura la capacità del vetro di isolare termicamente l'ambiente interno rispetto all'esterno, rappresenta la quantità di calore che attraversa il vetro per unità di area e differenza di temperatura, e influisce direttamente sull'efficienza energetica dell'edificio e sul comfort degli occupanti.

Nel nostro studio, abbiamo considerato vari scenari di trasmittanza termica del vetro per valutare come queste diverse condizioni influenzino le performance dei pannelli radianti. I vetri analizzati sono stati suddivisi in diverse categorie a seconda del loro U_w , rappresentando così diverse condizioni di isolamento termico.

Queste categorie comprendono vetri con basse, medie e alte prestazioni termiche, ciascuna delle quali è stata simulata tramite pannelli radianti progettati per replicare le rispettive proprietà di trasmittanza.

Successivamente, abbiamo ipotizzato varie tipologie di vetro (Tab. 1), con differenti configurazioni di intercapedine, per rispecchiare il più possibile le tre diverse trasmittanze termiche predefinite.

[14]

Trasmittanza termica dei vetri U_w					
Tipo	Vetro	Dimensioni (in mm)	U (w/m^2K)		
			-	Aria	Argon
Vetro semplice	monolitico non trattato	10	5,6		
Doppio vetro	vetro senza trattamento superficiale (vetro normale)	4 - 6 - 4			3
		4 - 9 - 4		3	
Triplo vetro	vetro con trattamento superficiale (basso emissivo)	4 - 12 - 4 - 12 - 4			1
	vetro con trattamento superficiale (emissività $\leq 0,05$)	4 - 12 - 4 - 12 - 4		1	

Tabella 1 – Ipotesi di diverse tipologie di vetro in base alle trasmittanze U_w .

Dopo aver definito le diverse tipologie di vetro si è passati ad impostare i valori relativi alla ventilazione meccanica controllata della camera climatica.

Per ottimizzare il sistema dei ricambi ora d'aria [15] all'interno della test room, sono state simulate quattro differenti tipologie di ambiente scolastico. La simulazione ha tenuto conto del calcolo della portata d'aria secondo le normative stabilite dal DM 18/12/75, associando una specifica percentuale di funzionamento dell'impianto VMC a ciascuna tipologia. Le categorie simulate e i relativi parametri sono i seguenti:

1. Scuola senza impianto di ventilazione
 - Ricambio ora: $n = 0 \text{ h}^{-1}$
 - Percentuale velocità ventilare: 0%

2. Scuole materne ed elementari
 - Ricambio ora: $n = 2,5 \text{ h}^{-1}$
 - Percentuale velocità ventilare: 43 %

3. Scuole medie
 - Ricambio ora: $n = 3,5 \text{ h}^{-1}$
 - Percentuale velocità ventilare: 58 %

4. Scuole secondarie di secondo grado

- Ricambio ora: $n = 5 \text{ h}^{-1}$
- Percentuale velocità ventilare: 80%

Per ciascuna tipologia di scuola, la percentuale di funzionamento della velocità del ventilatore è stata impostata attraverso un software di controllo dedicato. Le impostazioni operative del sistema sono state monitorate e verificate in tempo reale tramite il pannello di controllo (Fig 18), assicurando il corretto funzionamento secondo i parametri prestabiliti.

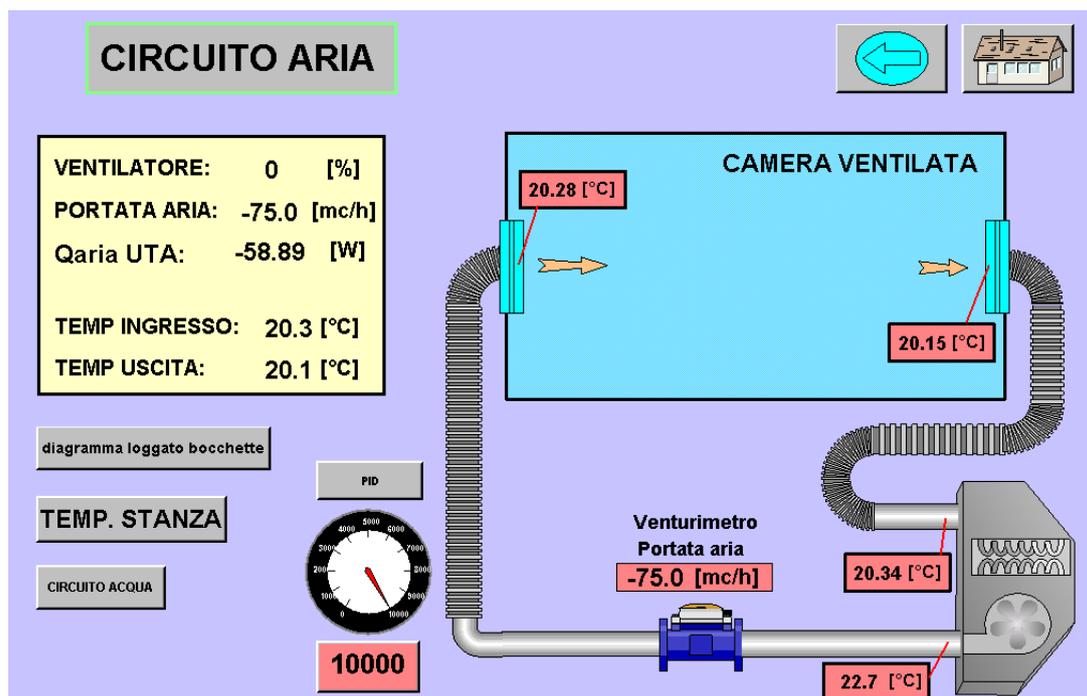


Fig.17. Screen del pannello di controllo per verifica dei parametri del circuito aria.

Infine, si è proceduto con l'inserimento del sistema di riscaldamento nella test room.

Per analizzare l'efficacia e le caratteristiche di diverse soluzioni di riscaldamento, sono stati utilizzati, in differenti momenti, due tipi distinti di riscaldamento:

- Electric Heater (Riscaldatore Elettrico)
- Electric Radiator (Radiatore ad olio Elettrico)

Entrambi i dispositivi sono stati messi in funzione a una potenza di 1000 W, consentendo un confronto diretto delle loro prestazioni energetiche e della loro capacità di riscaldamento.

La stufa elettrica (EH) (Fig. 19) è una soluzione di riscaldamento molto diffusa, particolarmente apprezzata per la sua capacità di riscaldare rapidamente l'ambiente. Il principio di funzionamento di questo dispositivo si basa sulla conversione diretta dell'energia elettrica in calore, tramite l'uso

di elementi riscaldanti. Questi elementi, spesso costituiti da fili metallici ad alta resistenza, si riscaldano non appena viene applicata corrente elettrica, emettendo calore immediatamente.

Tuttavia, uno degli svantaggi principali di questa tecnologia è il suo elevato consumo energetico. L'efficienza della stufa elettrica nel generare calore rapidamente si traduce spesso in un maggiore consumo di energia, soprattutto se utilizzata per periodi prolungati. Inoltre, il calore prodotto tende a concentrarsi nelle immediate vicinanze della stufa, risultando in una distribuzione meno uniforme del calore all'interno della stanza.

Il termosifone ad olio elettrico (ER) (Fig 19) rappresenta una soluzione di riscaldamento che combina efficienza e comfort. Il funzionamento di questo dispositivo si basa sul riscaldamento di un fluido termoconduttore, contenuto all'interno del radiatore. Una volta riscaldato, l'olio circola all'interno del termosifone, trasferendo il calore all'esterno in modo graduale e uniforme. Questo processo consente di mantenere una temperatura costante e piacevole all'interno dell'ambiente, anche dopo che il termosifone è stato spento, poiché l'olio mantiene il calore per un periodo di tempo prolungato. Sebbene richieda più tempo per raggiungere la temperatura desiderata rispetto alla stufa elettrica, il termosifone ad olio elettrico offre una distribuzione del calore più uniforme e una maggiore efficienza energetica a lungo termine



Fig.18. Foto dei due tipi di riscaldatori test-room.
A sinistra la stufa elettrica e a destra il termosifone ad olio elettrico.

3.3.3 Parametri ambientali fondamentali: temperatura dell'aria, temperatura operativa, velocità dell'aria, draught rate, PMV, PPD

Nella misurazione del comfort e dis-comfort degli ambienti, ci sono dei parametri ambientali fondamentali.

Nel presente capitolo andremo a definirli al fine di comprenderne meglio l'entità e l'importanza nella progettazione degli spazi per il benessere degli occupanti.

Temperatura dell'aria (°C)

Per temperatura dell'aria rappresenta la temperatura dell'aria che circonda il lavoratore nell'ambiente di lavoro.

La temperatura dell'aria è un parametro cruciale per valutare il comfort termico all'interno di uno spazio, poiché influisce direttamente sulla percezione di caldo o freddo da parte degli occupanti. Monitorare la temperatura dell'aria è essenziale per mantenere condizioni ambientali ottimali, sia in spazi lavorativi che residenziali. Assicurarsi che la temperatura sia adeguata contribuisce non solo al comfort, ma anche alla salute e al benessere degli occupanti, rendendo l'ambiente più vivibile e produttivo.

Temperatura operativa (°C)

La temperatura operativa rappresenta una misura combinata della temperatura dell'aria e della temperatura radiante media delle superfici circostanti. Questo parametro offre una valutazione più completa del comfort termico percepito dagli occupanti di un ambiente rispetto alla sola temperatura dell'aria.

La temperatura radiante media si riferisce alla temperatura media delle superfici che circondano una persona, come pareti, soffitti, pavimenti e oggetti presenti nella stanza. Essa viene intesa come la temperatura uniforme di una cavità immaginaria in cui lo scambio termico radiativo dal corpo umano è uguale allo scambio termico radiativo nell'ambiente non uniforme.

Misurare la temperatura operativa richiede strumenti che possono rilevare entrambi i lavori sopra citati. Termometri a bulbo umido e secco, termocoppie e termometri a sfera sono gli strumenti più comunemente utilizzati.

In conclusione, la temperatura operativa risulta essere importante in quanto gli esseri umani percepiscono il calore non solo dall'aria, ma anche dalle superfici circostanti tramite irraggiamento.

Velocità dell'aria (m/s)

La velocità dell'aria è una grandezza vettoriale caratterizzata da intensità e direzione. Essa rappresenta la rapidità e la direzione del movimento dell'aria in un determinato ambiente.

Per misurare accuratamente questa grandezza, è necessario utilizzare strumenti che tengano conto di diversi fattori: la sensibilità alla direzione del flusso, la capacità di rilevare variazioni di velocità dell'aria e la possibilità di ottenere una velocità media. Tra gli strumenti utilizzabili ci sono gli anemometri a filo caldo, gli anemometri a girante e gli anemometri a tazza.

Misurare correttamente la velocità dell'aria è importante perché l'aria in movimento può influenzare significativamente la percezione della temperatura e il benessere delle persone in un ambiente.

Ad esempio, l'aria in movimento può raffreddare la pelle tramite l'evaporazione del sudore e la convezione, riducendo così la sensazione di calore. Al contrario, in ambienti freddi, una bassa velocità dell'aria può aiutare a mantenere una sensazione di calore.

Draught rate (%)

Il draught rate rappresenta il livello di dis-comfort locale causato dalle correnti d'aria all'interno di un ambiente. Questo parametro dipende principalmente dalla velocità dell'aria, dalla temperatura ambiente e dalla turbolenza dell'aria. Valori elevati di draught rate indicano una maggiore percezione di freddo e disagio da parte delle persone presenti.

Il disagio da correnti d'aria (indice DR) è calcolato [16] tramite la seguente formula:

$$DR = (34 - t_a) * (v_a - 0,05)^{0,62} * (37 * SD + 3,14)$$

dove:

- t_a è la temperatura dell'aria (°C)
- v_a è la velocità media locale dell'aria (m/s)

Per descrivere la variabilità della velocità del flusso d'aria, utilizziamo spesso il termine intensità della turbolenza. Essa è definita come:

$$Tu = 100 * SD / v_a$$

Il valore del draught rate, quindi, dipende dalla temperatura, dalla velocità e dalla turbolenza dell'aria nel punto in cui si valuta il disagio e aumenta all'aumentare della velocità e della turbolenza e al diminuire della temperatura. L'aria a temperatura più bassa, a parità di velocità e turbolenza, procura quindi un disagio maggiore; così come l'aria con elevata turbolenza, ovvero costituita da flussi caotici, a parità di temperatura e velocità, procura un disagio maggiore di un flusso d'aria uniforme.

Per misurare il draught rate, vengono utilizzati strumenti specifici chiamati anemometri, che registrano la velocità dell'aria in diversi punti dell'ambiente.

PMV - Predicted Mean Vote

Il PMV è un indice predittivo utilizzato per stimare il voto medio che un gruppo di persone assegnerebbe al comfort termico in base a diversi fattori ambientali e fisiologici. Queste variabili includono la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la velocità dell'aria, la temperatura media radiante, il tasso di attività metabolica degli individui e il livello di isolamento termico dell'abbigliamento.

Il PMV è espresso su una scala a 7 punti, dove 0 rappresenta una condizione di neutralità termica. Gli estremi della scala sono +3, corrispondente a una sensazione di "molto caldo", e -3, corrispondente a una sensazione di "molto freddo". La determinazione del PMV richiede l'uso di modelli matematici avanzati che integrano le suddette variabili per prevedere la percezione del comfort termico in un ambiente specifico.

L'applicazione del PMV nelle scuole è particolarmente rilevante, poiché un ambiente termicamente confortevole può influenzare positivamente il benessere e le prestazioni degli studenti. Pertanto, la valutazione accurata del PMV, mediante l'analisi dei parametri microclimatici e delle caratteristiche fisiologiche degli occupanti, è essenziale per progettare e mantenere ambienti scolastici ottimali.

PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied

Il PPD rappresenta la percentuale di individui che si prevede saranno insoddisfatti del comfort termico in base al valore del PMV. Più alto è il PMV (positivo o negativo), maggiore sarà il PPD, indicando che una percentuale maggiore di persone potrebbe non sentirsi a proprio agio nell'ambiente termico studiato. Viceversa, un PMV più vicino a 0 corrisponde a un PPD minore, indicando che la maggior parte delle persone dovrebbe essere soddisfatta delle condizioni termiche.

Il PPD si ottiene utilizzando una relazione empirica che correla il valore del PMV con la percentuale di persone insoddisfatte del comfort termico. Tipicamente, questa relazione è espressa attraverso curve o tabelle empiriche derivanti da studi e ricerche sul comfort termico.

Nell'ambito scolastico, la valutazione del PPD è cruciale per assicurare un ambiente termicamente confortevole che favorisca il benessere e le prestazioni degli studenti. L'adozione di metodologie accurate per la determinazione del PMV e del PPD, basate su parametri microclimatici e fisiologici, è fondamentale per il design e la manutenzione di ambienti scolastici ottimali.

3.3.4 Strumenti

ComfortSense Dantec

Il ComfortSense Dantec (Fig. 25) [17] rappresenta una soluzione avanzata per il monitoraggio del comfort termico, in linea con gli standard internazionali ASHRAE 55 e ISO 7730 [18]. Questo strumento è stato progettato per eseguire indagini sul comfort termico dove sono richieste misurazioni di alta qualità e precisione. È essenziale per lo sviluppo e la valutazione di sistemi di riscaldamento e condizionamento dell'aria. Il sistema può essere equipaggiato con fino a 16 sonde per telaio, permettendo una caratterizzazione dettagliata dell'ambiente termico.

Le sonde includono modelli omnidirezionali per la misurazione delle correnti d'aria, dotate di una risposta in frequenza di almeno 2 Hz, essenziali per ottenere dati accurati sulle correnti d'aria. Inoltre, sono disponibili sonde ad alta velocità, in grado di misurare velocità dell'aria fino a 30 m/s e temperature nel range da -20°C a +80°C, utilizzate per i condotti di ventilazione e altre strutture di prova. Le sonde di temperatura operativa, grazie alla loro forma ellittica, sono progettate per simulare persone in diverse posizioni (sdraiate, sedute, in piedi), offrendo così una valutazione completa del comfort termico.

Il software associato allo strumento consente una facile configurazione delle sequenze di misurazione e la creazione di griglie di misurazione personalizzate, selezionando le sonde da una libreria definita dall'utente. I dati raccolti possono essere visualizzati sotto forma di tabelle, grafici e file compatibili con Excel.

Uno degli aspetti più avanzati del ComfortSense Dantec è la sua capacità di calcolare i parametri di comfort termico, come il Voto Medio Previsto (PMV) e la Percentuale di Insoddisfatti Prevista (PPD). Questi calcoli prendono in considerazione le misurazioni delle correnti d'aria, della temperatura operativa e dell'umidità, oltre a parametri come il tasso metabolico (MET) e l'isolamento dell'abbigliamento (CLO), in conformità con gli standard ASHRAE 55 e ISO 7730. Questo permette una valutazione accurata del comfort termico percepito dagli occupanti.

Il dispositivo è dotato di tre sonde che effettuano misurazioni simultanee a tre diverse altezze dal pavimento:

- 10 cm, per rilevare condizioni termiche a livello del pavimento
- 60 cm, per simulare condizioni a livello del seduto
- 110 cm, per simulare condizioni a livello del in piedi.

Questo approccio a più livelli garantisce una valutazione completa del comfort termico in diverse zone dell'ambiente investigato.

Transducer type 54T33 and 54T34 Temperature compensated omnidirectional probe.

Velocity range, operating	0.05 to 10 m/s
Calibrated range	0.10 to 5 m/s
Temperature range, operating	-20 to +70°C
Temperature range, storage	-40 to +85°C
Accuracy, velocity (room temp.)	
0-1 m/s	±2%OR ±0.02 m/s
1-5 m/s	±5%OR
5-10 m/s	>±5%OR
Accuracy, temperature (values in brackets: radiation included)	
0 – +45 °C	±0.5 K (±0.2 K)
÷10 – +60 °C	±1 K (±0.3 K)
÷20 – +70 °C	±2 K (±0.5 K)
Protection, mechanical	Spherical 'cage'

Transducer type 54T29 Temperature Compensated Reference Velocity anemometer.

Velocity range	0.05 to 30 m/s
Accuracy at calibration temperature	±2 % OR ±0.02 m/s
Velocity signal output, approx.	0 to 5 V
Temperature range	10 to 35 °C
Temperature drift, typically	±0.05 %/K *
Overall length	Approx. 370 mm
Length, lock ring to center of sensor	250 mm
Shaft diameter (shield)	∅ 6 mm

*) Using ComfortSense software to acquire and correct probe signal

Fig.19. Specifiche tecniche ComfortSense Dantec pt.1.

Transducer type 54T35 Temperature Compensated Draught anemometer.

Velocity range	0.10 to 30 m/s
Accuracy at calibration temperature	
0.2 to 20 m/s	±2 %OR ±0.02 m/s
20 to 30 m/s	±5 %OR
Temperature reading range	-20 to + 80 °C
Accuracy at velocities above 0,5 m/s	±0.5 °C, radiation excluded
Time constants	Velocity typical 2-3 sec, depending of velocity
	Temperature typical 4-5 sec depending of velocity
Temperature compensation error on velocity	Less than 0.2% OR per 1 °C change in air temperature
Overall length	340 mm with protective cap up
	295 mm with protective cap down
Shaft diameter	Ø 10 mm

Velocity range	0.05 to 5 m/s
Temperature range	-20 to 80 °C
Accuracy, velocity (room temp.)	
0 to 1 m/s	±2 % OR ±0,02 m/s
1 to 5 m/s	±5 % of reading
Accuracy, temperature - at velocities above 0.35 m/s, radiation excluded	
0 to 45 °C	±0.5 K
-20 to 60 °C	±1 K
60 to 80 °C	±2 K
Protection, mechanical	Spherical "cage"

Fig.20. Specifiche tecniche ComfortSense Dantec pt.2.

Transducer type 54T21 Low Velocity anemometer (modified version 54T260).

Velocity range	0.05 to 5 m/s
Temperature range	-20 to 80 °C
Accuracy, velocity (room temp.)	
0 to 1 m/s	±2 % OR ±0,02 m/s
1 to 5 m/s	±5 % of reading
Accuracy, temperature – at velocities 0.1 - 1 m/s (original 54T21 range), radiation excluded	
0 to 45 °C	±0.5 K
-20 to 60 °C	±1 K
60 to 80 °C	±2 K
Protection, mechanical	Spherical "cage"

Transducer type 54T37 Humidity and Air Temperature anemometer.

Humidity range	0 –100 % RH (Relative Humidity)
Accuracy	
0 to +10 °C	+2 % RH
10 to +10 °C	+1.5 % RH
30 to +45 °C	+2 % RH
Dynamic absolute humidity	Time constant 1 minute 90% response: 4 minutes (when air velocity less 0.1 m/s)
Dynamic response, air temperature and RH	Time constant 10 minutes 90% response: 30 minutes (when air velocity less 0.1 m/s)
Stability, Typical values in normal air	Drift less than 1% RH pr year and 0.1 K per year.

Fig.21. *Specifiche tecniche ComfortSense Dantec pt.3.*

Humidity range	0 – 100 % RH (Relative Humidity)
Accuracy	
0 to +10 °C	+2 % RH
10 to +10 °C	+1.5 % RH
30 to +45 °C	+2 % RH
Dynamic absolute humidity	Time constant 1 minute 90% response: 4 minutes (when air velocity less 0.1 m/s)
Dynamic response air temperature and RH	Time constant 10 minutes 90% response: 30 minutes (when air velocity less 0.1 m/s)
Stability. Typical values in normal air	Drift less than 1% RH pr year and 0.1 K per year.

Transducer type 54T38 Operative Temperature anemometer.

Temperature range	0 to 45 °C
Accuracy	
0 to +10°C	±0.5 K
10 to +40°C	±0.2 K
40 to +45°C	±0.5 K
Dynamic response	Time constant 2 minutes 90 % response: 7 minutes (All values established in environment with air velocity less than 0.1 m/s)

Fig.22. Specifiche tecniche ComfortSense Dantec pt.4.

15.2 ComfortSense Frame

Number of input channels per frame	Up to 16 channels
Temperature range, operating	-20 to +70 °C
Power requirements, anemometer at room temperature*	+9 to +12 VDC
Current consumption (10 m/s)	approx. 200 mA per channel
Output voltage, approx.	0 to 5 VDC
Frequency response	>2 Hz
Input connectors	12 pole Fisher 103A series
Output termination	USB 2.0 connector
Input requirements, data acquisition	Single ended via USB 2.0

* Please decrease voltage from 12 VDC to 9 - 10 VDC if temperature is higher than 30 °C.

15.3 ComfortSense Mini

Number of channels per unit	1
-----------------------------	---

15.4 Cables

Cable length, standard	5, 10 and 20 m interconnectable
Cable length, non-standard	special cable length on request

15.5 ComfortSense Case

Stores safely the ComfortSense Frame and accessories together with probes (included in the standard delivery)



Fig.24. Foto strumento ComfortSense Dantec.

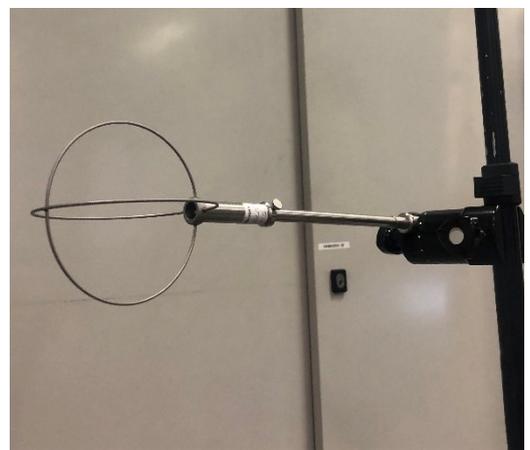
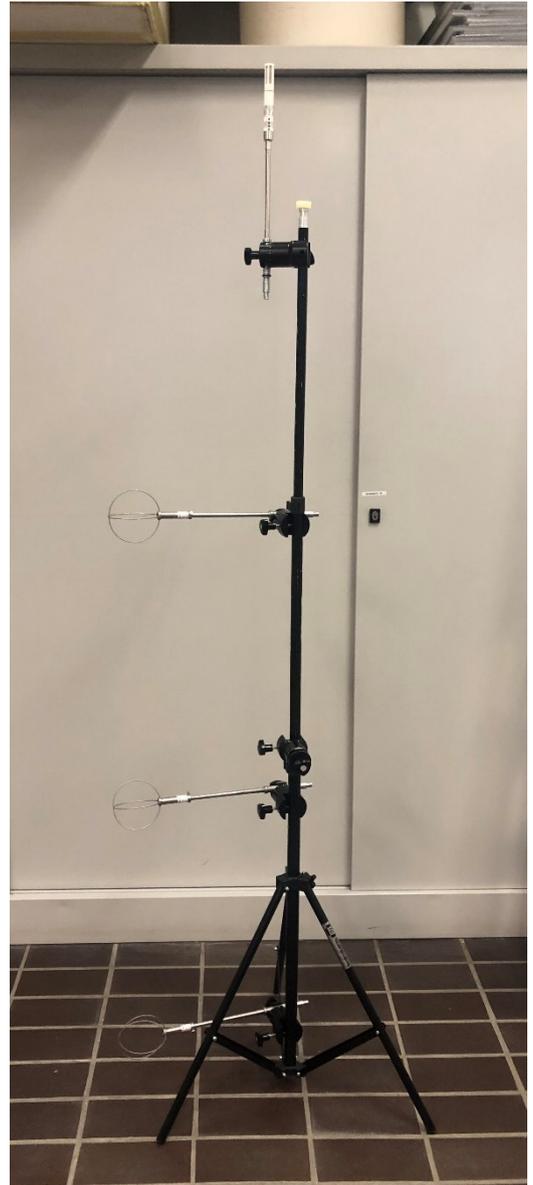


Fig.25. Foto zoom sensori di rilevazione ComfortSense Dantec.

Manichino termico

I manichini termici di PT Teknik [19] sono strumenti di alta tecnologia utilizzati per la misurazione delle risposte fisiologiche umane in diversi ambienti, con l'obiettivo di testare l'efficacia dei capi di abbigliamento e monitorare il comfort termico negli ambienti. Essi si basano su ricerche scientifiche avanzate e tecnologie all'avanguardia, presentano una forma corporea naturale, sia maschile che femminile, e sono dotati di un cablaggio ottimizzato che garantisce una dispersione uniforme del calore. Questi manichini sono in grado di misurare con estrema precisione la temperatura cutanea e la perdita di calore, calcolando parametri fondamentali come la temperatura equivalente e gli indici di sensazione termica (PMV/PPD). Grazie alla presenza di numerose zone termiche indipendenti, è possibile rilevare il flusso di calore e la temperatura superficiale con elevata accuratezza. In particolare, il manichino impiegato in questa analisi è caratterizzato da 27 parti indipendenti che registrano la temperatura equivalente.

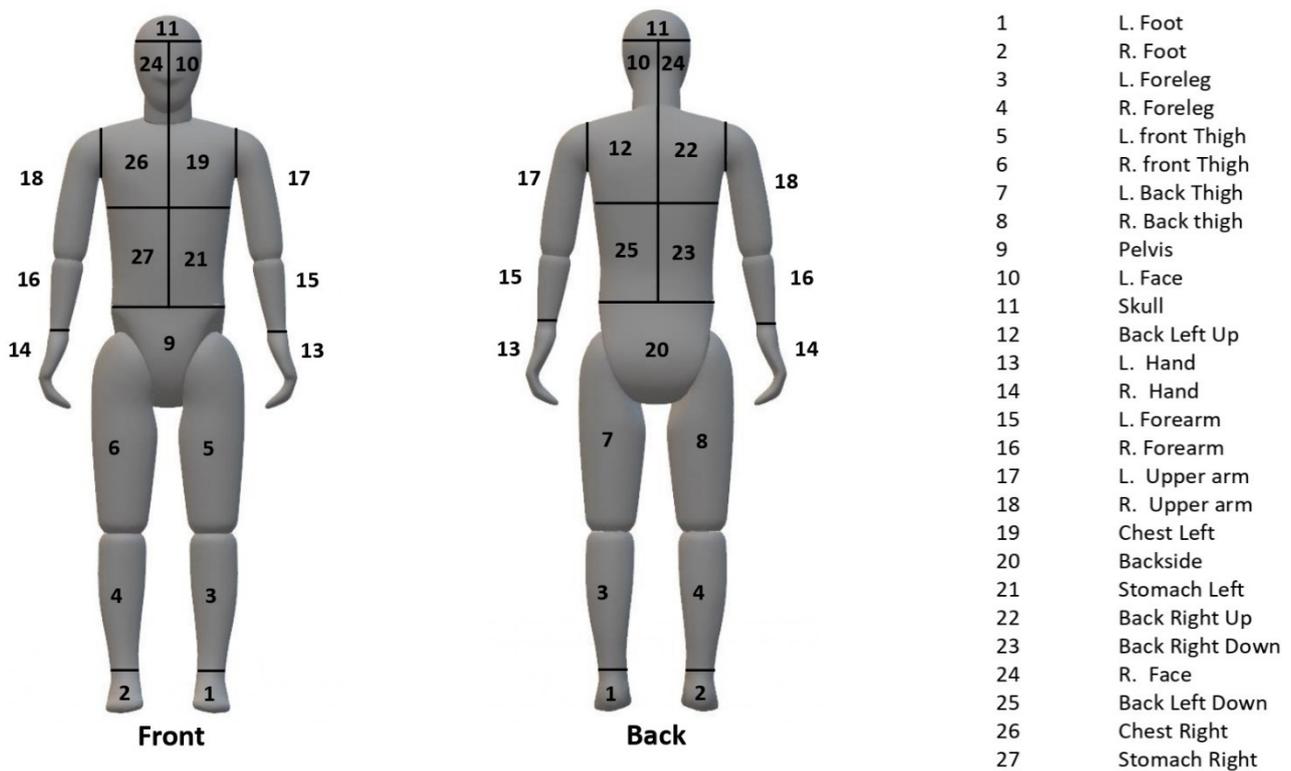


Fig.26. Manichino termico fronte - retro e identificazione delle 27 zone di acquisizione.

I manichini sono progettati per essere posizionati in diverse posture, incluse le posizioni in piedi, seduti o sdraiati, al fine di simulare varie condizioni di utilizzo. La gestione dei manichini avviene tramite un software intuitivo su PC, il quale offre funzionalità avanzate di monitoraggio e registrazione dei dati. Questo software consente una gestione precisa e dettagliata delle

misurazioni, facilitando l'analisi e l'interpretazione dei dati raccolti. Tale sistema è essenziale per migliorare la comprensione delle condizioni di comfort termico e valutare l'efficacia dei capi di abbigliamento testati.

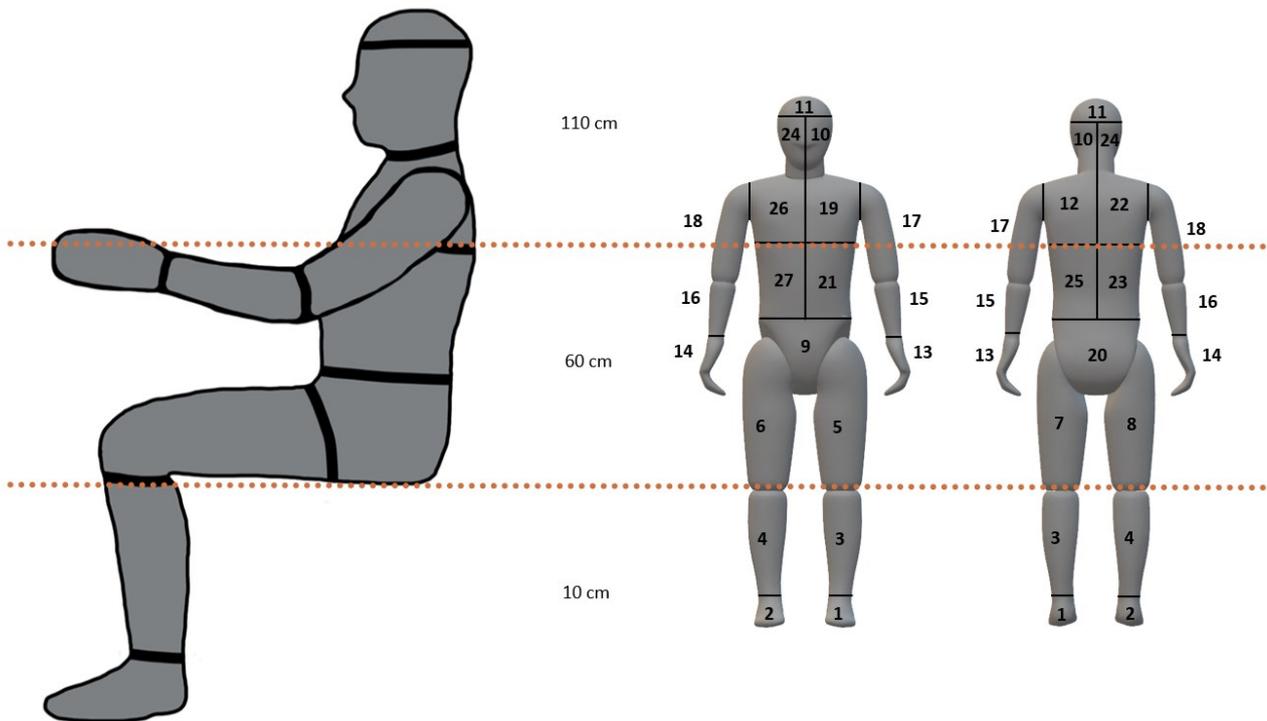


Fig.27. Manichino termico seduto e individuazione delle tre altezze.

Nel presente studio, il manichino è stato collocato in posizione seduta e vestito per le diverse prove. Le 27 aree di misurazione sono state suddivise in tre altezze corrispondenti ai punti di acquisizione dello strumento ComfortSense Dantec, al fine di consentire un confronto tra i vari dati raccolti.

Le suddivisioni delle aree sono state effettuate come segue:

- 0,1 m dal pavimento: include le parti dal piede allo stinco
- 0,6 m dal pavimento: comprende dal ginocchio alla parte superiore dell'addome
- 1,1 m dal pavimento: copre dal petto fino alla testa

Questa segmentazione assicura che il manichino seduto rappresenti le stesse altezze rilevate dallo strumento Dantec. In questo modo, è possibile garantire che i dati acquisiti siano rappresentativi delle diverse altezze del corpo umano, permettendo un confronto accurato delle condizioni di comfort termico nelle varie parti del corpo.



Fig.28. *Anatomia del manichino termico.*



Fig.29. *Manichino termico vestito.*

3.3.5 Studio dei dati ottenuti: le Mappe del Comfort

L'analisi dei valori ottenuti con lo strumento ComfortSense Dantec è stata effettuata attraverso l'utilizzo di fogli di calcolo Excel e del software Tecplot 360. La combinazione di questi due strumenti ha permesso la realizzazione delle Mappe del Comfort.

Le Mappe del Comfort (o Comfort Maps) sono strumenti utilizzati per visualizzare e valutare il comfort termico in spazi architettonici o ambienti urbani. Esse rappresentano graficamente la distribuzione spaziale delle condizioni di comfort, consentendo di identificare le aree dell'ambiente che possono essere percepite come confortevoli o meno dal punto di vista termico.

Le mappe in questione sono spesso presentate utilizzando diverse modalità di visualizzazione, come colori graduali o mappe di calore, che indicano le variazioni di comfort termico all'interno dello spazio.

L'immagine, fornita istantaneamente, ci permette di visualizzare i 3 parametri che meglio descrivono il dominio del comfort termico:

- temperatura dell'aria (°C)
- temperatura operativa (°C)
- velocità dell'aria (m/s)
- draught rate (%)

Il software Tecplot 360, sviluppato dalla società americana Tecplot, è un software avanzato per la visualizzazione e l'analisi dei dati provenienti dalla fluidodinamica computazionale (CFD) e altre simulazioni numeriche. Questo strumento è essenziale per elaborare e interpretare i risultati complessi ottenuti da simulazioni post-elaborazione, come nel caso specifico dell'analisi dei dati di comfort provenienti dallo strumento ComfortSense Dantec.

Il lavoro di analisi dei risultati ha seguito le seguenti fasi:

1. estrazione dei risultati dal software dello strumento ComfortSense Dantec (specializzato nella misurazione e nel monitoraggio delle variabili ambientali);
2. organizzazione dei dati tramite fogli di calcolo Excel, con l'individuazione di ogni punto di presa del monitoraggio e gestione accurata dei dati per ogni altezza di presa (10 cm, 60 cm, 110 cm).

Durante questa fase, sono stati calcolati i valori medi di temperatura dell'aria, temperatura operativa, velocità dell'aria e draught rate per ogni punto di presa nell'arco dei 10/15 minuti di registrazione dello strumento. In particolare, è stato applicato un metodo di calcolo che esclude i primi e gli ultimi due minuti di registrazione per minimizzare l'effetto di eventuali disturbi causati dall'interferenza umana, come l'entrata o l'uscita dell'operatore dalla stanza. Questo approccio ha permesso un'ulteriore precisione nella raccolta dei dati e una più facile comprensione dei fenomeni ambientali critici.

TEMPERATURA DELL'ARIA ALLE 3 ALTEZZE				
POSIZIONI	X (m)	Y (m)	Z (m)	T (°C)
1	0,6	0,3	1,1	19,85
2	0,6	1,2	1,1	19,87
3	0,6	2,1	1,1	19,84
4	0,6	3	1,1	19,84
5	0,6	3,9	1,1	19,93
6	1,2	0,3	1,1	20,38
7	1,2	1,2	1,1	19,96
8	1,2	2,1	1,1	19,80
9	1,2	3	1,1	20,22
10	1,2	3,9	1,1	19,96
11	1,8	2,1	1,1	19,85
12	2,4	2,1	1,1	19,86
13	3	2,1	1,1	19,90
1	0,6	0,3	0,6	19,86
2	0,6	1,2	0,6	19,88
3	0,6	2,1	0,6	19,89
4	0,6	3	0,6	19,87
5	0,6	3,9	0,6	19,94
6	1,2	0,3	0,6	20,19
7	1,2	1,2	0,6	19,95
8	1,2	2,1	0,6	19,84
9	1,2	3	0,6	20,08
10	1,2	3,9	0,6	19,94
11	1,8	2,1	0,6	19,82
12	2,4	2,1	0,6	19,83
13	3	2,1	0,6	19,84
1	0,6	0,3	0,1	19,56
2	0,6	1,2	0,1	19,44
3	0,6	2,1	0,1	19,49
4	0,6	3	0,1	19,39
5	0,6	3,9	0,1	19,43
6	1,2	0,3	0,1	19,86
7	1,2	1,2	0,1	19,51
8	1,2	2,1	0,1	19,51
9	1,2	3	0,1	19,74
10	1,2	3,9	0,1	19,52
11	1,8	2,1	0,1	19,56
12	2,4	2,1	0,1	19,50
13	3	2,1	0,1	19,58

Tabella 2 – Esempio di Tabella Excel con valori medi temperatura dell'aria per i 13 punti di presa per le tre altezze

$$U_w = 1W/m^2K.$$

Attraverso l'elaborazione dei dati Excel implementati all'interno del software Tecplot360 si sono ottenute le Mappe del Comfort. La zona di lavoro in cui verrà realizzata la mappa termica viene generata in automatico dal programma in funzione delle coordinate assegnate ai punti di presa, le zone dove non sono presenti punti di presa vengono determinate attraverso l'interpolazione dei dati noti.

In questa fase, in base ai valori assegnati alla coordinata Z (m), si possono ottenere superfici o volumi. Un esempio di superficie potrebbe essere quella ricavata dai dati relativi alla temperatura operativa (in cui il globo viene posizionato ad un'altezza costante di 60 cm da terra) mentre un esempio di volume è quello che si ottiene nel caso della mappa della velocità dell'aria in cui i sensori sono posizionati a 3 altezze differenti (10, 60, 110 cm).

Nel software Tecplot 360, nella finestra "file", selezionando l'opzione "Load Data File", è possibile caricare i dati da tabelle Excel (Tab. 2), scegliendo l'opzione di caricamento "Text Spreadsheet Loader" (Fig. 31). Dopodiché, nella sezione "Data", sotto "Data set Info", si verifica che i dati siano stati importati correttamente e che il parametro T (°C) sia presente come variabile indipendente.

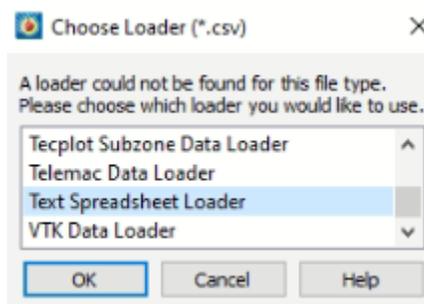


Fig.30. Inserimento delle tabelle Excel nel software Tecplot 360.

Successivamente, si crea l'area di lavoro per la mappa termica. Questa viene generata automaticamente dal programma in base alle coordinate assegnate ai punti di rilevamento, utilizzando la funzione "Create Zone" (Fig. 32) e selezionando "Rectangular zone" nella finestra "Data"

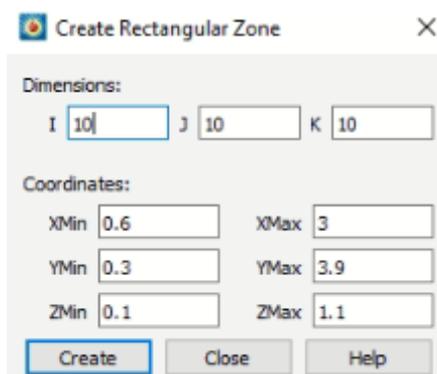


Fig.31. Creazione della zona rettangolare di lavori.

Una volta creata questa zona, si passa all'interpolazione dei dati. Nella sezione “data” del software, si accede all'opzione “Interpolation” e si sceglie “Inverse distance” (Fig. 33). A questo punto, si seleziona la Zona 1 come fonte dei dati e la nuova zona rettangolare come “Destination zone”.

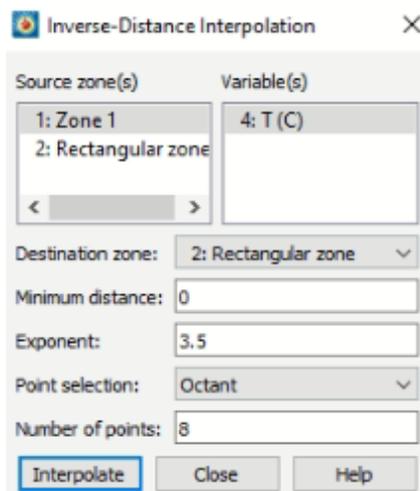


Fig.32. Interpolazione dei dati.

Una volta impostati questi parametri, il software esegue l'interpolazione. Questo processo consente di calcolare i valori medi delle variabili nei diversi punti con coordinate note, creando così una superficie o un volume che mostra come queste variabili variano nello spazio assegnato.

Per visualizzare il risultato finale, si utilizza la funzionalità “Zone style” (Fig. 34). In questa fase, si disattiva la visibilità della Zona 1 e si rende visibile solo la zona rettangolare. Attivando la funzione “Contour” (Fig. 35), si ottiene la mappa desiderata.

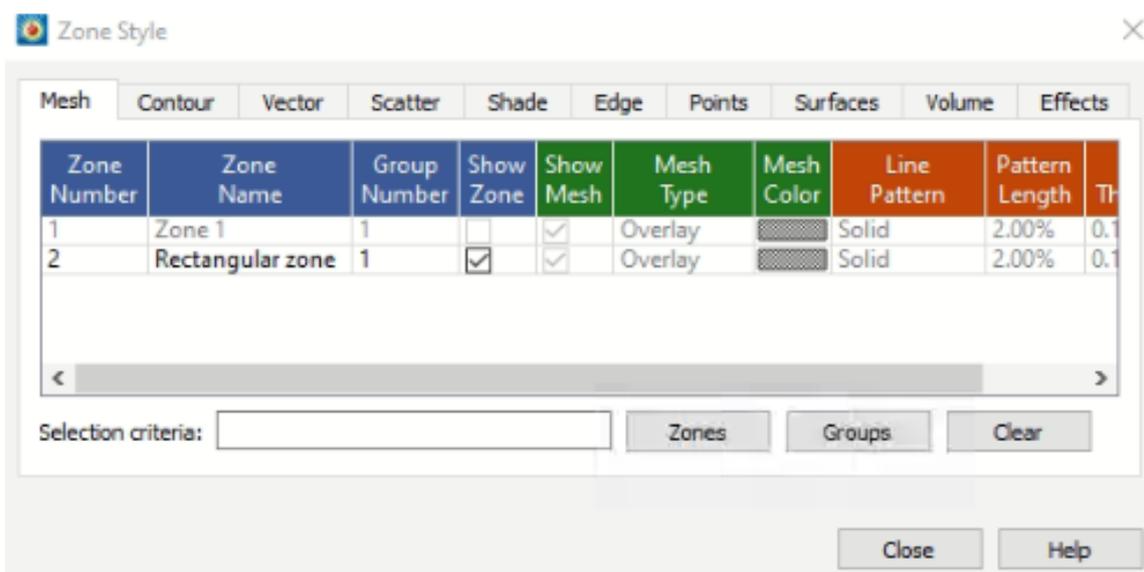


Fig.33. Funzionalità “Zone Style”

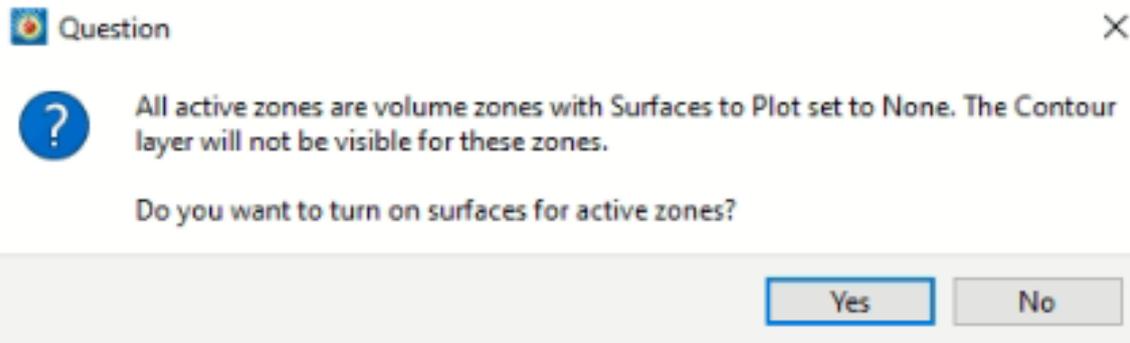


Fig.34. Contour.

Il tipo di risultato ottenuto può essere un volume o una superficie, a seconda dei valori assegnati alla coordinata Z. Il software permette la realizzazione di sezioni a diverse altezze e lungo diversi assi in base alle necessità dell'analisi in corso.

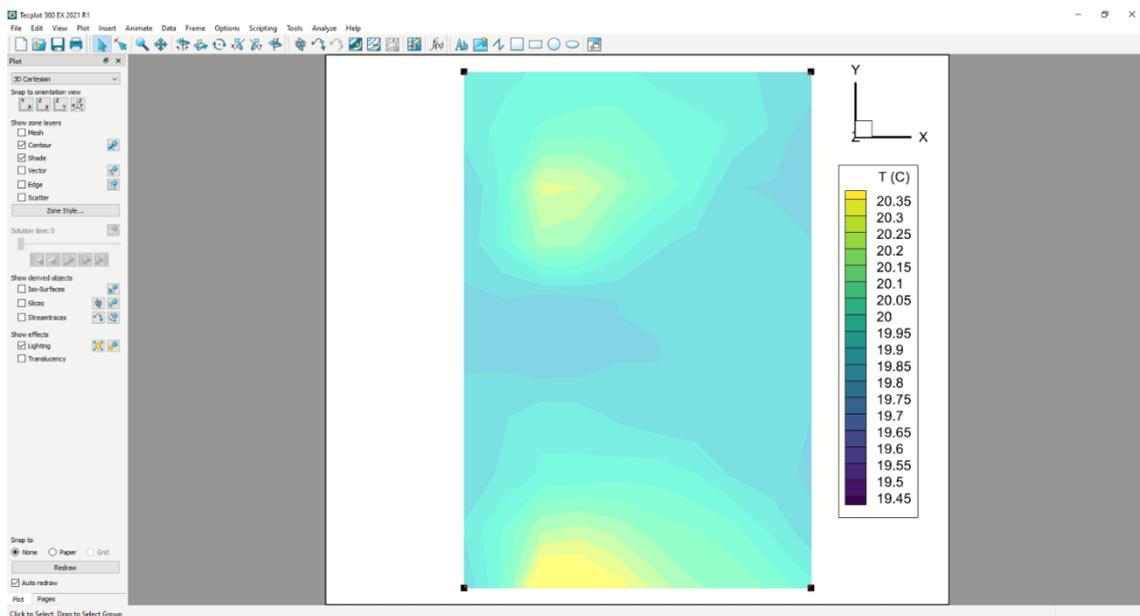


Fig.35. Esempio di mappa termica della temperatura dell'aria (°C) e interfaccia del software Tecplot 360.

Nel seguente elaborato si riportano solo grafici con superfici in quanto più efficaci nella comunicazione dei vari risultati alle 3 altezze (10, 60, 110 cm).

3.4 Riferimenti normativi

La norma tecnica di riferimento utilizzata per la misurazione della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa e della temperatura media radiante è la **UNI EN ISO 7726:2002** "Ergonomia degli ambienti termici – Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche" [20] che fornisce sia le principali indicazioni per la misura dei parametri microclimatici che le caratteristiche degli strumenti da impiegare. In questo contesto, lo strumento ComfortSense della DANTEC Dynamics risulta essere uno strumento di monitoraggio conforme alle norme EN 13182, ISO 7726, ISO 7730, standard ASHRAE 55 e 113.

Tale normativa, inoltre, raccomanda dei valori altezze ai quali posizionare i sensori per la misurazione dei parametri microclimatici in un ambiente chiuso in caso di individuo seduto. Questi valori sono:

- livello della testa (corrispondente ad un'altezza di 1,1 m per soggetti seduti e di 1,7 m per soggetti in piedi)
- livello dell'addome (corrispondente ad un'altezza di 0,60 m per soggetti seduti e di 1,1 m per soggetti in piedi)
- livello della caviglia (corrispondente ad un'altezza di 0,10 m)

Table 5 - Measuring heights for the physical quantities of an environment						
Locations of the sensor	Weighting coefficients for measurements for calculation mean values				Recommended heights (for guidance only)	
	Homogeneous environment		Heterogeneous environment		Sitting	Standing
Class C	Class S	Class C	Class S			
Head level			1	1	1,1 m	1,7 m
Abdomen level	1	1	1	2	0,6 m	1,1 m
Ankle level			1	1	0,1 m	0,1 m

Tabella 3 – Altezze di misurazione per le grandezze fisiche di un ambiente.

Standard internazionali come l'**ISO 7730** [18] e l'**ASHRAE 55** [21] definiscono le linee guida per la misurazione e l'interpretazione della temperatura operativa. Questi standard stabiliscono i criteri per valutare il comfort termico in base alla temperatura operativa e forniscono raccomandazioni per la progettazione degli ambienti interni.

Per quanto riguarda le valutazioni effettuate durante il progetto di monitoraggio della test-room, è stato necessario riferirsi alle normative attualmente vigenti in materia di determinazione della portata d'aria quali: il **Decreto Ministeriale del 18 dicembre 1975** [22] e la **UNI 10339** [23] .

In particolare, il DM 18/12/75 stabilisce, in funzione della tipologia di scuola e di aula, il valore del coefficiente di ricambio d'aria n , espresso in 1/h, per il calcolo della portata d'aria da fornire all'ambiente interessato. Grazie ad un'equazione, tale coefficiente andrà moltiplicato per il volume interno dell'ambiente per determinare la portata da fornire secondo normativa. I valori del coefficiente n sono riportati nel capitolo 5.3.12. del DM.

$$Q_{(DM\ 18/12/75)} = V_{ambiente} * n_{(DM\ 18/12/75\ (5.3.12.)}$$

La norma UNI 10339 da indicazioni sul calcolo della portata d'aria che varia in funzione dell'indice di affollamento n_s , dell'area dell'ambiente e della portata d'aria esterna per persona Q_{op} . Questi valori danno origine ad un'altra equazione di seguito riportata. L'indice di affollamento e la portata d'aria per persona dipendono dalla destinazione d'uso dell'ambiente considerato e sono riportati rispettivamente all'interno del Prospetto VIII e del Prospetto III della UNI 10339.

$$Q_{(UNI\ 10339)} = A_{ambiente} * n_{s(Prospetto\ VIII)} * Q_{op(Prospetto\ III)} * 3.6$$

La norma tecnica di riferimento utilizzata per le misure è la **UNI EN 12599:2012** "Ventilazione per edifici - Procedure di prova e metodi di misurazione per la presa in consegna di impianti di ventilazione e di condizionamento dell'aria"[24] . Essa specifica i controlli, i metodi di prova e gli strumenti di misura per verificare l'idoneità all'uso dei sistemi installati per la presa in consegna. La norma permette di scegliere tra metodi di prova semplici e misurazioni estese, quando necessario. Si applica alla ventilazione ad azionamento meccanico e ai sistemi di aria condizionata.

4. RISULTATI

Durante le prove nella camera di test, abbiamo acquisito diversi dati utilizzando la ComfortSense Dantec e un manichino termico. I parametri principali considerati sono stati la temperatura dell'aria (°C), la temperatura operativa (°C), la temperatura equivalente (°C), la velocità dell'aria (m/s), il draught rate (%), il PMV e il PPD.

Questi dati, raccolti con precisione dalla strumentazione, ci forniscono un quadro dettagliato delle condizioni ambientali e del livello di comfort nella camera di prova. Procediamo ora con l'analisi dettagliata di ciascun parametro per comprendere meglio le dinamiche del comfort termico nel contesto specifico della nostra indagine.

4.1 Incidenza della velocità dell'impianto in funzione della trasmittanza termica del vetro

Nel contesto della climatizzazione degli edifici, la trasmittanza termica del vetro gioca un ruolo cruciale nella determinazione dell'efficienza energetica e del comfort ambientale. La trasmittanza termica, espressa come valore U_w , misura il tasso di trasferimento del calore attraverso il vetro e influisce direttamente sul carico termico dell'edificio.

Per analizzare l'incidenza della velocità dell'impianto in funzione della trasmittanza termica del vetro, consideriamo due differenti sistemi di riscaldamento:

1- Electric Heater (Riscaldatore Elettrico)

I riscaldatori elettrici, noti anche come stufe elettriche, generano calore attraverso resistenze elettriche. Questo tipo di sistema è generalmente utilizzato per riscaldare singole stanze o aree limitate ed è caratterizzato da un'accensione rapida e un riscaldamento immediato. Tuttavia, può essere meno efficiente dal punto di vista energetico se utilizzato su larga scala.

2- Electric Radiator (Radiatore Elettrico)

I radiatori elettrici operano mediante fluidi termovettori riscaldati da elementi elettrici interni. Questi dispositivi forniscono un riscaldamento più uniforme e graduale rispetto ai riscaldatori elettrici, risultando più efficienti per il riscaldamento di spazi più grandi. Tuttavia, possono richiedere più tempo per raggiungere la temperatura desiderata.

L'analisi della velocità dell'impianto in funzione della trasmittanza termica del vetro per questi due sistemi di riscaldamento permette di comprendere meglio come diversi materiali e tecnologie possano influenzare le performance energetiche degli edifici. In particolare, la trasmittanza termica del vetro influisce direttamente sul comfort termico interno e sull'efficienza dell'impianto di riscaldamento. Un vetro con bassa trasmittanza termica (valore U_w basso) riduce la dispersione di calore, mantenendo l'ambiente interno più caldo durante i mesi invernali e contribuendo a un minor utilizzo dell'impianto di riscaldamento.

Il comfort termico all'interno degli edifici è fondamentale per garantire benessere e produttività. Nelle strutture scolastiche, dove gli studenti passano molte ore al giorno, un buon isolamento termico può fare una differenza significativa.

4.1.1 EH – Electric Heater

I test sono stati condotti all'interno di una camera climatica, riscaldata utilizzando una stufa elettrica. Durante i test, è stato mantenuto costante il valore della trasmittanza termica del vetro della finestra, fissato a:

$$U_w = \frac{5 \text{ W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Questo valore di trasmittanza termica rappresenta una finestra con bassa efficienza energetica, che consente un significativo passaggio di calore. Utilizzare questo parametro nei test della camera climatica ha lo scopo di replicare le condizioni tipiche delle finestre di edifici scolastici più datati, caratterizzati da un isolamento termico non ottimale.

Le finestre con un alto valore di U_w permettono al calore di disperdersi facilmente, il che può influire negativamente sul comfort termico all'interno delle aule scolastiche, soprattutto durante i mesi invernali. Mantenere costante questo parametro nei test ha permesso di valutare l'efficacia della stufa elettrica nel mantenere una temperatura confortevole all'interno della camera climatica.

I test hanno considerato vari aspetti dell'Indoor Environmental Quality (IEQ), come la temperatura dell'aria, la temperatura operativa, la velocità dell'aria e il tasso di turbolenza (drought rate). La velocità dell'aria è un fattore cruciale per il comfort termico, poiché correnti d'aria eccessive possono causare disagio agli studenti. Il tasso di turbolenza, o drought rate, misura la percezione di freddo causata dalle correnti d'aria, anche in presenza di temperature relativamente elevate.

Le prove svolte forniscono dati preziosi che possono guidare interventi migliorativi nelle scuole più vecchie. Tali interventi garantiscono ambienti di apprendimento più confortevoli, che contribuiscono al benessere degli studenti e alla loro capacità di concentrazione, promuovendo al contempo una maggiore sostenibilità ed efficienza energetica.

Le prove forniscono dati preziosi che possono orientare interventi migliorativi nelle scuole più vecchie, assicurando ambienti di apprendimento più confortevoli e sostenibili. Questi interventi contribuiscono al benessere degli studenti e alla loro capacità di concentrazione, promuovendo al contempo una maggiore efficienza energetica.

Air temperature (°C)

Le tabelle successivamente riportate (Tab. 4 e 5) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura dell'aria (°C) (Fig. 37) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione peggiore in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singola a bassa prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un riscaldatore elettrico.

Osservando i gradienti termici verticali, quindi la differenza di temperatura rilevata a 0,1 m e 1,1 m da terra nello stesso punto, si può verificare che non tutti sono inferiori al limite di 3° C fissato dalla normativa UNI EN 7730. Alcuni sono davvero vicini al limite imposto ed altri sono addirittura al di sopra (punto di presa 5 per $n = 0 \text{ h}^{-1}$, punto 1 per $n = 2,5 \text{ h}^{-1}$) (Tab. 5).

Possiamo notare come, indipendentemente dall' aumento della velocità dei ricambi d'aria/ora, la condizione meno vantaggiosa, quindi la più fredda, è sempre quella con altezza uguale a $z = 0,1 \text{ m}$. Quella più favorevole, quindi con temperature più alte, risulta essere sempre quella a $z = 1,1 \text{ m}$. Si verifica una variazione di temperatura tra 0,1 m e 1,1 m di circa 1,9°C. Questo spiega il fenomeno della stratificazione delle temperature, dove l'aria calda, essendo più leggera di quella fredda, tende a salire verso il soffitto, mentre quella fredda ristagna a livello del pavimento.

In presenza di un vetro a scarsissime prestazioni e dunque ad alta trasmittanza, notiamo che, in corrispondenza della finestra e del termosifone, troviamo i punti con le maggiori differenze di temperatura. I punti 3 e 8, in corrispondenza del termosifone elettrico, risultano essere quasi sempre i più caldi in tutte e quattro le combinazioni e a tutte le altezze, mentre quelli subito adiacenti (punti di presa 2 e 4, 7 e 9) sono solitamente i più freddi perché influenzati da temperature più basse uscenti dal vetro. In particolare, con l'impianto di ventilazione meccanica spento, possiamo verificare dalla tabella (tab n. X) una variazione delle temperature di circa 2,4°C nei vari punti sopra citati. Con l'impianto alla massima potenza di ventilazione, queste variazioni risultano comunque elevate (circa 2°C), evidenziando come il tipo di riscaldamento incida notevolmente nella distribuzione del calore interno, superando anche l'effetto della ventilazione meccanica.

Facendo riferimento al DM 18/12/1975 - Ambienti scolastici, che stabilisce che la temperatura interna per questa tipologia di edifici non deve essere superiore o inferiore ai $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, possiamo notare che in alcuni casi questa normativa non viene rispettata.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	18,46	19,77	20,67	18,34	19,81	21,42	18,61	19,39	20,53	19,36	20,29	22,01
2	17,93	18,79	20,52	18,06	19,53	20,33	19,19	20,17	21,63	18,47	19,75	20,56
3	20,17	20,56	22,03	18,79	19,31	19,45	20,48	20,86	22,22	20,30	20,55	21,94
4	17,76	19,30	19,85	17,08	18,57	18,83	18,03	19,56	20,05	17,91	19,38	19,73
5	17,43	19,28	20,63	17,28	18,56	19,73	18,12	19,31	20,38	18,35	19,69	20,82
6	18,18	19,11	20,31	18,07	19,13	20,09	19,29	20,19	21,78	18,19	19,13	19,84
7	18,74	19,55	21,07	17,60	19,08	19,65	18,49	19,34	20,47	17,84	19,30	19,73
8	20,19	20,71	22,27	19,01	19,48	20,28	19,07	19,53	20,50	19,36	19,90	20,75
9	17,54	18,87	19,63	18,69	19,96	21,19	17,67	19,07	19,81	18,36	19,75	20,57
10	18,35	19,60	21,28	18,86	19,90	21,87	18,93	20,04	21,59	19,19	20,33	22,08
11	18,78	19,63	20,49	19,04	19,69	20,75	18,73	19,34	20,35	18,57	19,18	19,95
12	19,24	19,67	21,14	18,62	19,15	20,04	18,43	19,21	20,04	19,68	20,28	21,87
13	19,73	20,04	21,88	19,69	19,94	21,45	19,40	19,72	21,47	18,99	19,53	20,44
Δ T (°C) max	2,76	1,93	2,64	2,61	1,39	3,04	2,81	1,79	2,42	2,46	1,43	2,35

Tabella 4 – Valori medi della temperatura dell'aria per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	Δ Tv (°C)	Δ Tv (°C)	Δ Tv (°C)	Δ Tv (°C)
1	2,21	3,08	1,92	2,65
2	2,59	2,26	2,44	2,09
3	1,86	0,66	1,74	1,64
4	2,09	1,75	2,03	1,82
5	3,20	2,44	2,26	2,47
6	2,13	2,03	2,49	1,64
7	2,33	2,05	1,98	1,89
8	2,08	1,27	1,44	1,39
9	2,09	2,50	2,14	2,21
10	2,92	3,01	2,67	2,88
11	1,71	1,71	1,62	1,39
12	1,90	1,43	1,60	2,19
13	2,14	1,76	2,07	1,45

Tabella 5 – Gradienti verticali della temperatura dell'aria per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

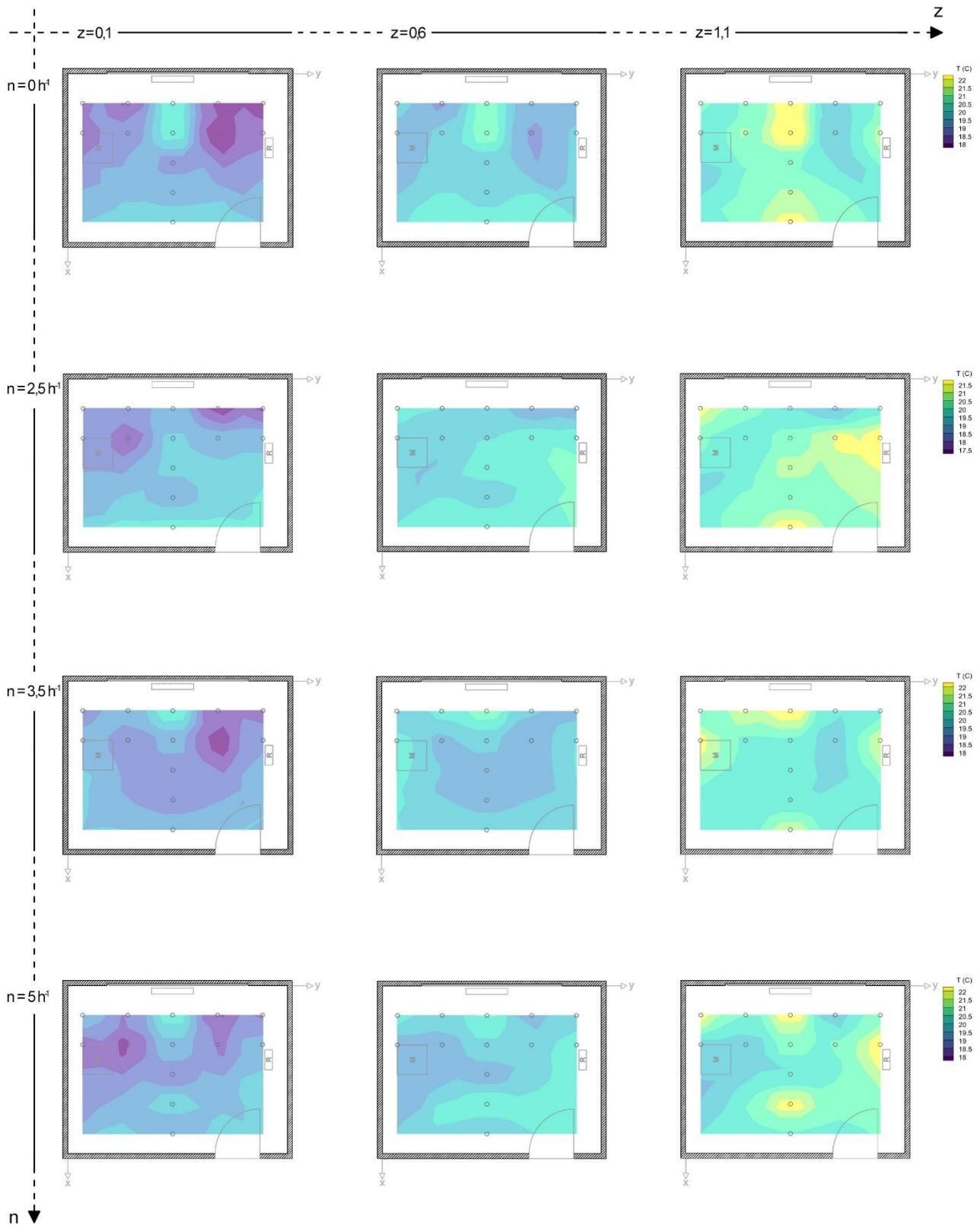


Fig.36. *Mappa del comfort della temperatura dell'aria (°C) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.*

Operative temperature (°C)

La temperatura operativa (°C) è stata misurata esclusivamente ad un'altezza di 0,6 metri dal suolo, sfruttando la posizione del sensore globo inclinato a 45°.

La tabella successiva (Tab. 6) riporta i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura operativa (°C) (Fig. 38) ad un'altezza fissa di 0,6 metri e con quattro diversi tassi di ricambio d'aria per ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione peggiore in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singola a bassa prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un riscaldatore elettrico.

In presenza di un vetro con prestazioni termiche molto basse e dunque ad alta trasmittanza, si nota che i punti in corrispondenza della finestra e del termosifone presentano le maggiori variazioni di temperatura. Il punto 3, situato di fronte alla stufa elettrica ad una distanza di 60 cm risulta essere quasi sempre il più caldo (valori segnati in rosso, Tab. 6) in tutte e quattro le velocità del sistema di ventilazione meccanica. Invece, il punto di presa 4, situato alla destra del punto 3 (il più caldo) è sempre il più freddo (valori segnati in blu, Tab. 6) in tutte le condizioni, poiché influenzati dalle basse temperature derivanti dal vetro performante.

Con i ricambi ora a $n = 0 \text{ h}^{-1}$, la differenza di temperatura tra il valore più alto e quello più basso nei 13 punti di presa è di 4°C. Quando il flusso dei ricambi d'aria è alla massima potenza la differenza tra i valori scende a circa 3,3°C. Questo dimostra chiaramente come un sistema di ventilazione meccanica efficace possa ridurre le variazioni di temperatura all'interno della stanza, migliorando il comfort termico complessivo e riducendo i punti di eccessivo riscaldamento o raffreddamento.

	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
		0,6		0,6		0,6		0,6
1		18,98		20,12		19,40		20,67
2		18,88		19,18		20,17		19,50
3		22,79		18,97		22,20		22,06
4		18,79		17,93		18,76		18,79
5		19,32		18,62		19,18		19,70
6		19,31		19,55		20,54		19,48
7		20,07		18,93		19,81		19,22
8		21,21		20,17		19,35		19,69
9		18,65		19,71		18,87		19,49
10		19,73		20,33		20,14		20,59
11		19,46		19,78		19,79		19,46
12		20,35		19,59		19,37		20,78
13		20,58		20,47		20,53		19,82
ΔT (°C) max		4,14		2,53		3,44		3,27

Tabella 6 – Valori medi della temperatura operativa per i 13 punti di presa a 0,6 m di altezza al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

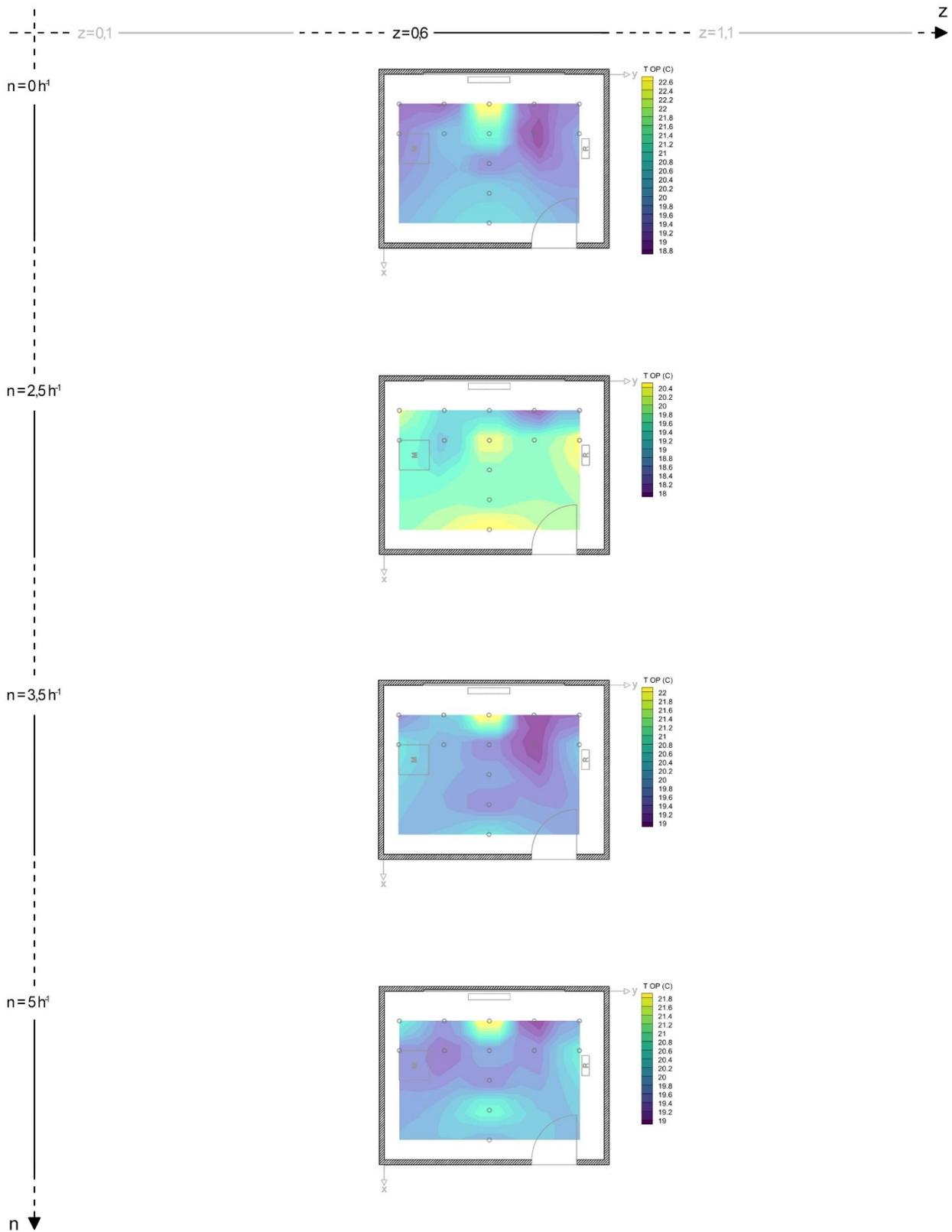


Fig.37. *Mappa del comfort della temperatura operativa ($^{\circ}\text{C}$) a 0,6 m di altezza al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.*

Air Velocity (m/s)

Le tabelle riportate (Tab. 7 e 8) contengono i dati numerici che sono stati rappresentati graficamente nella mappatura della velocità dell'aria (m/s) (Fig. 39) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione peggiore in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singolo a bassa prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da una stufa elettrica.

È evidente che, indipendentemente dall'aumento della velocità dei ricambi d'aria per ora, il flusso d'aria con le velocità maggiori si rileva sempre a un'altezza di 0,1 m. Al contrario, le velocità più basse si registrano costantemente a un'altezza di 1,1 m. Ad esempio, si osserva una variazione di velocità massima dell'aria tra 0,1 m e 1,1 m di circa 0,085 m/s con $n = 0 \text{ h}^{-1}$, una differenza che cresce ulteriormente con l'aumentare della velocità del sistema di ventilazione meccanica, fino ad arrivare a circa 0,095 m/s con $n = 5 \text{ h}^{-1}$.

In presenza di un vetro a basse prestazioni, e quindi ad alta trasmittanza, notiamo che, ad impianto di ventilazione meccanica spento ($n = 0 \text{ h}^{-1}$) e a un'altezza di $z = 0,1 \text{ m}$, si crea una mappa omogenea con flussi di velocità dell'aria davvero bassi, fino ad arrivare a 0,02 m/s nel punto 2 in corrispondenza della finestra, creando dis-comfort all'interno di tutta la camera di prova. Tuttavia, all'aumentare della velocità del sistema, rimanendo alla stessa altezza, si può vedere come la velocità dei flussi tenda ad aumentare, soprattutto nelle zone adiacenti alla stufa elettrica, evidenziando la sua influenza sulla velocità dei flussi d'aria.

Salendo con le altezze, a $z = 0,6 \text{ m}$ e $z = 1,1 \text{ m}$, notiamo come i picchi di velocità vanno man mano scomparendo in tutti i ricambi d'aria/ora; tuttavia, le velocità dei flussi tendono ad abbassarsi.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	0,051	0,035	0,034	0,048	0,023	0,056	0,031	0,038	0,025	0,043	0,027	0,019
2	0,057	0,022	0,017	0,113	0,028	0,024	0,090	0,026	0,023	0,093	0,030	0,023
3	0,061	0,029	0,028	0,097	0,054	0,049	0,070	0,026	0,024	0,061	0,039	0,022
4	0,117	0,025	0,026	0,119	0,027	0,022	0,125	0,026	0,029	0,133	0,024	0,024
5	0,058	0,022	0,022	0,053	0,022	0,022	0,048	0,024	0,028	0,049	0,023	0,040
6	0,072	0,038	0,023	0,049	0,023	0,024	0,043	0,033	0,023	0,045	0,027	0,018
7	0,054	0,022	0,019	0,122	0,027	0,024	0,084	0,025	0,019	0,106	0,027	0,025
8	0,050	0,028	0,025	0,049	0,027	0,020	0,085	0,049	0,028	0,065	0,045	0,026
9	0,106	0,025	0,023	0,112	0,025	0,026	0,135	0,031	0,026	0,115	0,033	0,027
10	0,058	0,031	0,029	0,053	0,029	0,033	0,070	0,039	0,028	0,052	0,035	0,029
11	0,075	0,026	0,024	0,081	0,035	0,027	0,041	0,023	0,017	0,052	0,036	0,022
12	0,045	0,027	0,021	0,056	0,031	0,019	0,068	0,027	0,023	0,049	0,026	0,024
13	0,041	0,034	0,026	0,040	0,032	0,023	0,032	0,024	0,017	0,075	0,031	0,026
ΔV (m/s) max	0,076	0,016	0,017	0,082	0,031	0,037	0,104	0,026	0,012	0,090	0,022	0,023

Tabella 7 – Valori medi della velocità dell'aria per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	ΔV_v (m/s)	ΔV_v (m/s)	ΔV_v (m/s)	ΔV_v (m/s)
1	-0,017	0,008	-0,006	-0,024
2	-0,040	-0,089	-0,067	-0,070
3	-0,033	-0,047	-0,046	-0,040
4	-0,091	-0,097	-0,096	-0,109
5	-0,036	-0,031	-0,020	-0,009
6	-0,049	-0,025	-0,020	-0,028
7	-0,035	-0,099	-0,065	-0,082
8	-0,025	-0,029	-0,057	-0,039
9	-0,084	-0,086	-0,109	-0,088
10	-0,029	-0,020	-0,043	-0,023
11	-0,051	-0,053	-0,025	-0,030
12	-0,024	-0,037	-0,045	-0,025
13	-0,015	-0,017	-0,015	-0,049

Tabella 8 – Gradienti verticali della velocità dell'aria per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

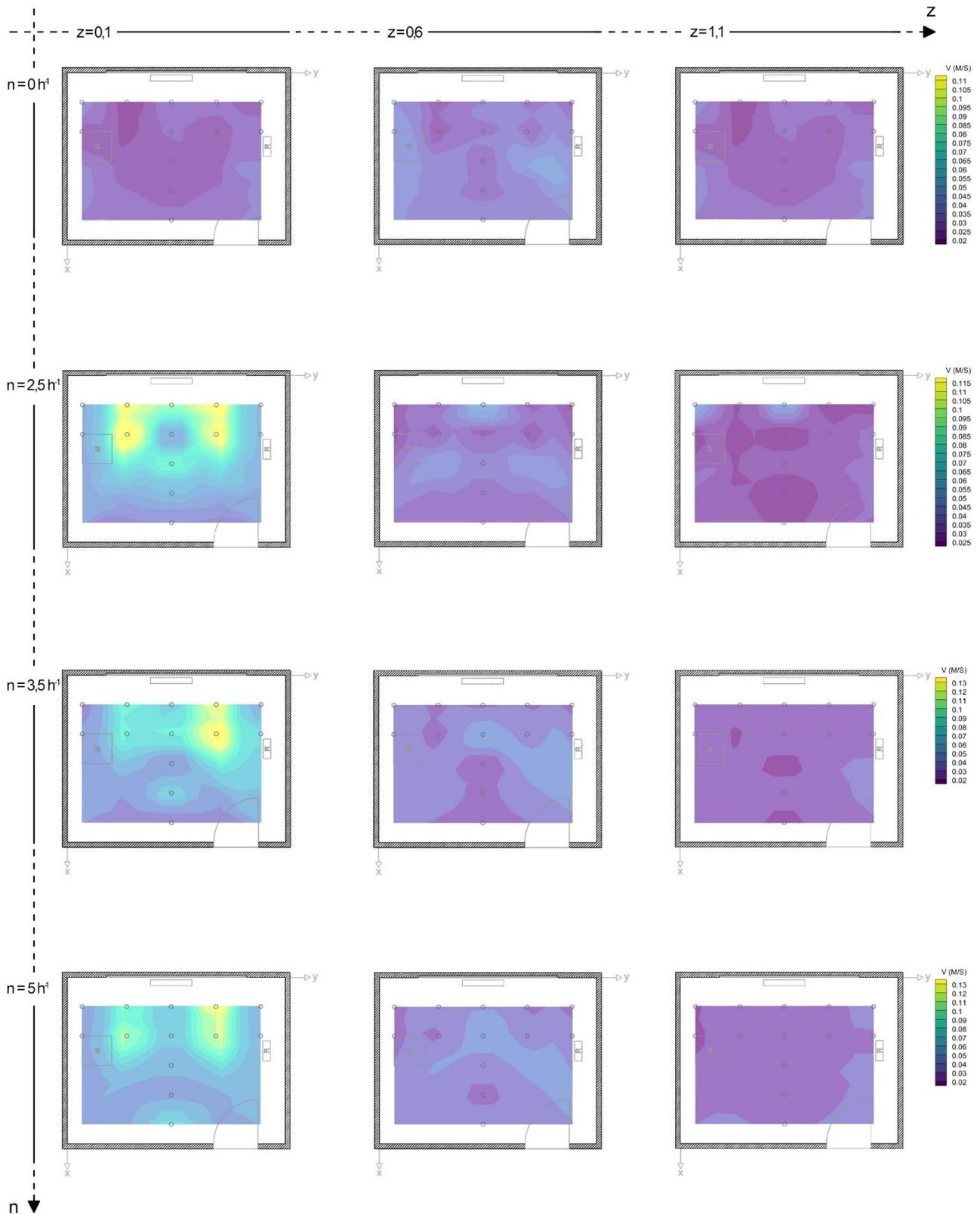


Fig.38. *Mappa del comfort della velocità dell'aria (m/s) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.*

Draught Rate (%)

Le tabelle riportate (Tab. 9 e 10) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura del draught rate (%) (Fig. 40) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione peggiore in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singolo a bassa prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da una stufa elettrica.

Osservando i gradienti verticali del draught rate (Tab. 10), ovvero la differenza di correnti d'aria rilevate a 0,1 m e 1,1 m da terra nello stesso punto, si osservi che non tutti i valori sono inferiori al limite del 15% stabilito dalla normativa UNI EN 7730. In particolare, il punto di presa 9 per $n = 3,5 \text{ h}^{-1}$ e il punto 4 per $n = 5 \text{ h}^{-1}$ (valori segnati in rosso, Tab. 10) sono superiori al limite prescritto.

Indipendentemente dall'aumento della velocità dei ricambi d'aria/ora del sistema meccanico di ventilazione, la condizione meno vantaggiosa, quindi con valori di draught rate maggiori, è sempre quella con altezza uguale a $z = 0,1 \text{ m}$. Ciò suggerisce una maggiore sensibilità al draught rate in prossimità del pavimento.

La variazione del discomfort termico tra 0,1 m e 1,1 m è di circa il 12% per $n = 0 \text{ h}^{-1}$, tale valore aumenta con l'incremento della velocità del sistema meccanico di ventilazione, arrivando al 14% circa per $n = 5 \text{ h}^{-1}$. Questo dato indica un aumento del discomfort con l'incremento della ventilazione, specialmente nella zona dei piedi.

Al crescere dell'altezza ($z = 0,6 \text{ m}$ e $z = 1,1 \text{ m}$), i valori di picco del draught rate diminuiscono gradualmente, portando a una situazione di comfort termico più uniforme. Tuttavia, questa omogeneità è associata a correnti d'aria quasi nulle.

I punti di presa 4 e 5 presentano quasi sempre valori di draught rate più elevati in tutte le combinazioni di velocità e quasi a tutte le altezze.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	2,142	0,426	0,573	2,382	0,000	2,733	0,223	0,062	0,000	1,655	0,000	0,000
2	3,368	0,000	0,053	11,593	0,000	0,138	7,648	0,066	0,003	8,581	0,009	0,000
3	2,807	0,056	0,000	8,900	2,163	1,863	4,234	0,151	0,007	3,032	1,119	0,000
4	12,293	0,000	0,141	14,171	0,010	0,000	13,832	0,000	0,057	15,344	0,058	0,012
5	3,589	3,589	0,149	2,591	2,591	0,310	2,210	2,210	0,690	2,258	2,258	1,345
6	4,995	0,346	0,000	1,694	0,044	0,140	1,156	0,399	0,000	1,614	0,096	0,013
7	2,390	0,000	0,106	12,917	0,000	0,000	6,577	0,018	0,078	10,275	0,040	0,035
8	2,107	0,113	0,140	1,546	0,084	0,000	6,965	1,966	0,033	3,871	1,720	0,000
9	10,725	0,028	0,000	11,221	0,000	0,061	15,010	0,000	0,000	11,776	0,153	0,062
10	3,213	0,077	0,162	2,260	0,228	0,357	4,913	0,186	0,000	2,279	0,270	0,113
11	5,526	0,137	0,000	6,531	0,814	0,062	1,211	0,030	0,000	2,956	1,168	0,087
12	1,388	0,358	0,574	3,087	0,159	0,000	5,048	0,175	0,000	2,243	0,057	0,000
13	0,780	0,403	0,201	0,931	0,102	0,000	0,070	0,000	0,000	5,084	0,274	0,000
Δ DR (%) max	11,513	3,589	0,574	13,240	2,591	2,733	14,940	2,210	0,690	13,730	2,258	1,345

Tabella 9– Valori medi del draught rate per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)
1	-1,569	0,351	-0,223	-1,655
2	-3,315	-11,454	-7,645	-8,581
3	-2,807	-7,037	-4,228	-3,032
4	-12,152	-14,171	-13,775	-15,332
5	-3,440	-2,282	-1,521	-0,913
6	-4,995	-1,554	-1,156	-1,601
7	-2,284	-12,917	-6,499	-10,240
8	-1,967	-1,546	-6,932	-3,871
9	-10,725	-11,159	-15,010	-11,714
10	-3,051	-1,903	-4,913	-2,166
11	-5,526	-6,469	-1,211	-2,870
12	-0,815	-3,087	-5,048	-2,243
13	-0,579	-0,931	-0,070	-5,084

Tabella 10– Gradienti verticali del draught rate per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

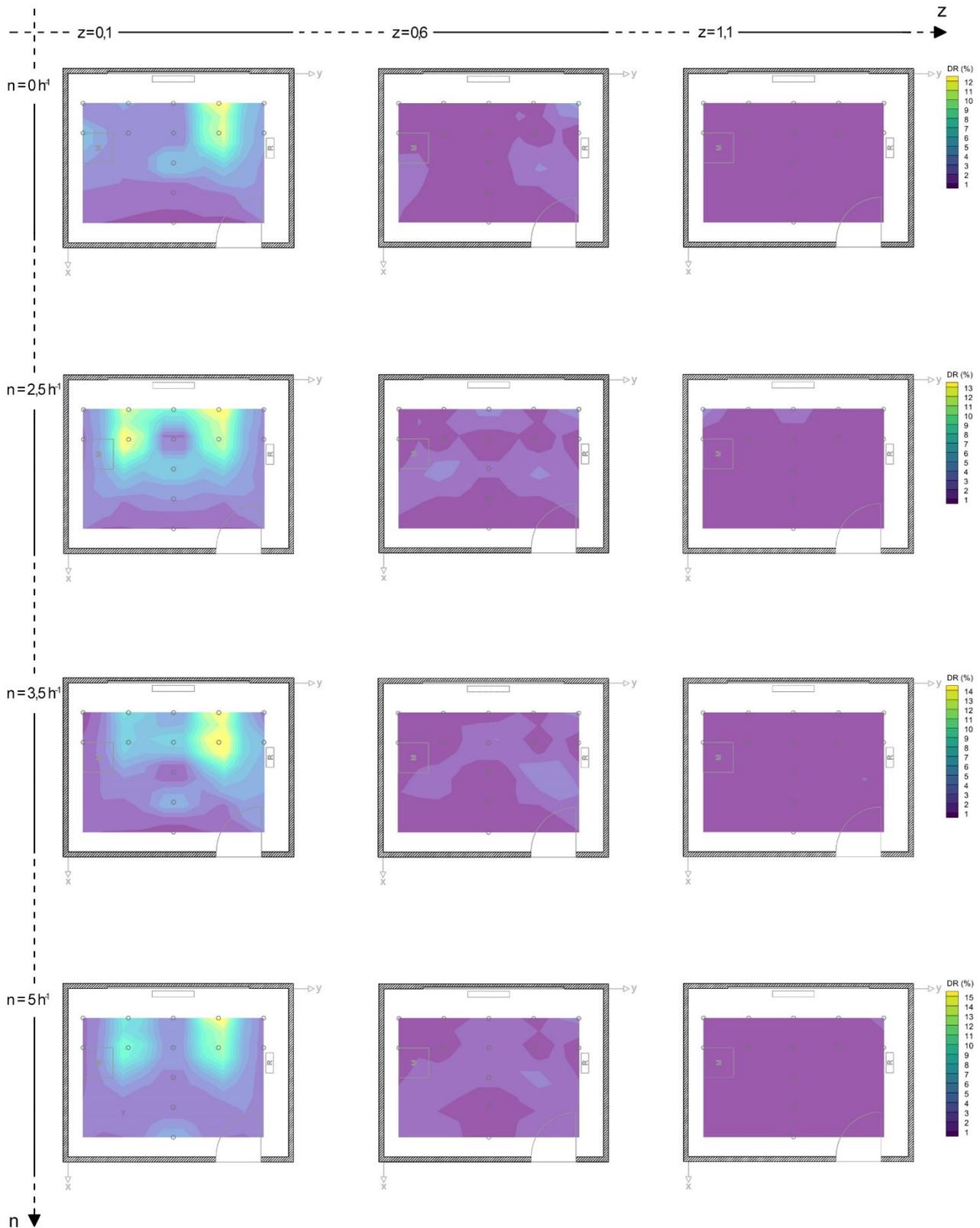


Fig.39. *Mappa del comfort del draght rate (%) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.*

Manichino termico

La tabella (Tab. 11) riporta la media dei dati acquisiti dalle 27 zone anatomiche del manichino termico, suddivise in tre macroaree del corpo, corrispondenti ai tre punti di rilevamento della ComfortSense Dantec (0,1 m, 0,6 m, 1,1 m). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione più critica in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singolo a bassa efficienza termica. La camera di prova è riscaldata da una stufa elettrica.

Posizionando il manichino nel punto di rilevamento 3, situato di fronte alla stufa ad una distanza di 60 cm, si osserva un incremento costante della temperatura (Fig. 41) in tutte e 27 le zone misurate, per ciascuna delle quattro condizioni di velocità del sistema di ventilazione meccanica controllata. Quando il manichino è posizionato nel punto di rilevamento 8, a una distanza di 120 cm dalla stufa, si osserva una distribuzione della temperatura pressoché uniforme indipendentemente dalla velocità dei ricambi di aria/ora (Fig. 42).

In entrambe le posizioni di rilevamento (punto 3 e punto 8), le temperature più elevate sono state registrate nella zona del bacino, con valori che raggiungono circa 31,7°C nel punto 3 e 32,6°C nel punto 8. È possibile osservare una differenza di quasi un grado tra le due posizioni, entrambe raggiungono le temperature massime ad una velocità dei ricambi d'aria/ora a $n = 5 \text{ h}^{-1}$. Le temperature più basse sono state rilevate in corrispondenza della mano sinistra, con valori di circa 27,5°C per il punto 3 e circa 25,5°C per il punto 8, entrambe per $n = 3,5 \text{ h}^{-1}$, con una variazione tra esse di 2°C.

I dati acquisiti dimostrano chiaramente l'impatto del sistema di riscaldamento e la posizione del manichino tra la parte destra e sinistra del corpo.

Per quanto riguarda il PMV (Tab. 12), ci troviamo in una situazione pressoché neutrale con $n = 0 \text{ h}^{-1}$, aumenta leggermente con l'incremento del tasso di ricambi d'aria/ora, fino a un valore massimo di 1, che indica una percezione di moderato caldo.

Per quanto concerne il PPD (Tab. 12), la percentuale di insoddisfatti è molto bassa quando il sistema di ventilazione è spento (circa il 6%) nel punto 3, questa percentuale aumenta con l'incremento della velocità del sistema di ventilazione meccanica, raggiungendo un massimo del 26,4% con $n = 3,5 \text{ h}^{-1}$.

n	Parti Corpo	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹		
		T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	
0,1	1	L. Foot	25,35	26,56	26,39	26,35	27,79	26,95	26,71	26,93
	2	R. Foot	26,78	27,42	27,71	27,43	28,53	27,84	28,27	28,06
	3	L. Foreleg	26,35	27,20	27,33	26,97	28,97	27,46	27,64	27,44
	4	R. Foreleg	26,30	27,33	26,96	27,12	27,99	27,40	27,42	27,51
0,6	5	L. Front Thigh	25,60	27,58	27,07	27,50	29,03	28,05	27,26	27,94
	6	R. Front Thigh	26,61	27,98	27,39	27,83	28,19	28,13	28,00	28,21
	7	L. Back Thigh	27,64	29,60	28,76	29,60	30,45	29,72	29,71	29,79
	8	R. Back thigh	28,13	29,80	29,00	29,73	29,75	29,80	29,71	29,90
	9	Pelvis	28,34	32,07	30,04	32,20	31,31	32,38	31,68	32,60
	20	Backside	28,87	31,32	29,88	31,40	30,81	31,54	31,05	31,70
	25	Back L.Down	29,24	31,41	30,19	31,50	31,05	31,64	31,00	31,80
	23	Back R. Down	29,49	31,11	30,18	31,20	30,83	31,30	30,90	31,47
	13	L. Hand	24,26	25,23	25,70	25,08	27,48	25,51	25,01	25,39
	14	R. Hand	25,42	25,87	25,58	25,68	26,09	25,88	25,90	26,02
	15	L. Forearm	25,64	27,39	26,73	27,25	28,01	27,73	27,13	27,67
	16	R. Forearm	27,09	28,43	27,80	28,30	28,53	28,49	28,35	28,58
	21	Stomach L.	26,68	28,50	27,74	28,42	28,80	28,78	28,27	28,82
27	Stomach R.	27,58	29,02	28,33	28,94	29,03	29,10	29,00	29,22	
1,1	17	L. Upper arm	25,02	27,05	25,88	27,08	26,89	27,59	26,51	27,58
	18	R. Upper arm	27,76	29,30	28,55	29,30	29,22	29,39	29,21	29,54
	19	Chest L.	25,09	27,40	26,14	27,40	27,29	27,85	26,90	27,92
	26	Chest R.	26,14	27,98	26,98	27,83	27,97	28,15	27,63	28,28
	12	Back L. Up	26,20	28,48	26,98	28,50	27,89	28,74	27,80	28,90
	22	Back R. Up	26,89	28,80	27,71	28,80	28,58	29,00	28,47	29,17
	10	L. Face	23,17	24,80	23,77	24,74	24,93	25,47	24,16	25,39
	24	R. Face	25,36	26,39	25,76	26,16	27,03	26,56	26,34	26,80
	11	Skull	25,79	27,84	27,09	27,72	28,13	28,13	27,55	28,27

Tabella 11– Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nei punti 3 ed 8, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8
PMV	0,26	0,80	0,60	0,80	1,01	0,92	0,80	0,95
PPD (%)	6,72	19,86	13,18	18,85	26,37	23,33	18,70	24,28

Tabella 12 – Valori medi PMV e PPD per i due punti di presa, 3 ed 8, al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

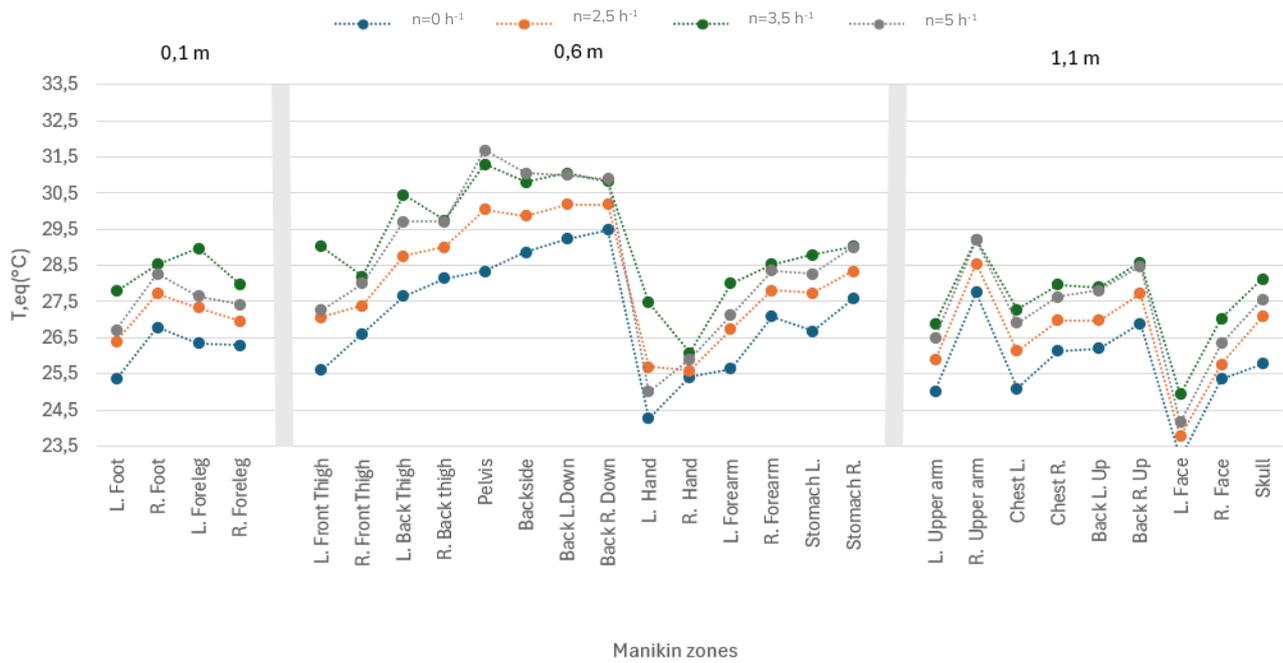


Fig.40. Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nel punto di presa 3, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

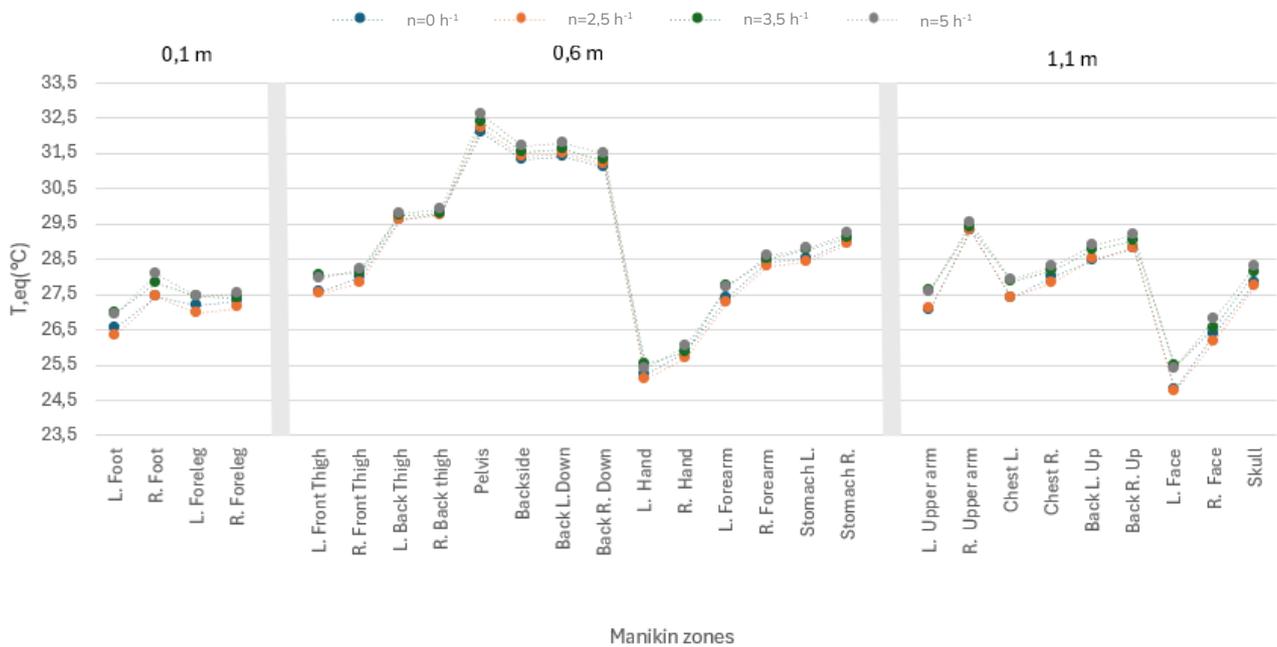


Fig.41. Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nel punto di presa 8, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Quando si analizzano dati un ambiente di prova, come una test room con trasmittanza fissata e dotata di ventilazione meccanica controllata con quattro diversi ricambi d'aria/ora, è essenziale garantire condizioni di test precise e costanti. La trasmittanza del vetro delle finestre e il tipo di riscaldamento giocano un ruolo significativo nell'influenzare la temperatura interna e il comportamento termico complessivo della stanza. Pertanto, ogni componente dell'ambiente deve essere attentamente valutato per assicurare la coerenza dei risultati.

In questo contesto, la decisione di escludere l'uso di una stufa elettrica per il riscaldamento della stanza è stata motivata da considerazioni legate all'impatto della stufa sui parametri ambientali e sulla qualità dei dati di prova.

La stufa elettrica introduce calore in modo localizzato e non uniforme. Questo comportamento influisce direttamente sulla temperatura dell'aria nell'area circostante, creando gradienti termici (Tab. 3) che possono alterare significativamente le condizioni di test. In una test room progettata per avere una trasmittanza specifica, è cruciale mantenere una temperatura il più possibile uniforme e controllata per garantire che i dati raccolti siano accurati e affidabili. L'uso della stufa elettrica, riscaldando maggiormente solo alcune zone, compromette questa uniformità, rendendo difficile ottenere misurazioni coerenti.

Inoltre, il calore emesso dalla stufa influisce anche sulla velocità dell'aria (Tab. 6) nella stanza. La stufa genera correnti d'aria che non riflettono le condizioni di ventilazione meccanica controllata progettate. Questa ventilazione è progettata per distribuire l'aria in modo uniforme e prevedibile, e l'aggiunta di una fonte di calore puntuale disturba questo equilibrio, creando flussi d'aria anomali e non rappresentativi delle condizioni di test desiderate.

Un'altra considerazione importante è il draught rate, ovvero il tasso di disagio causato dalle correnti d'aria. La stufa elettrica, riscaldando localmente, aumenta il draught rate in prossimità della stufa (Tab. 8), mentre in altre aree della stanza l'aria resta più stagnante. Questo squilibrio influisce non solo sul comfort percepito, ma anche sulla precisione delle misurazioni relative alla ventilazione meccanica controllata. Mantenere il draught rate entro limiti accettabili è fondamentale per garantire la validità dei risultati e il comfort degli occupanti.

Alla luce di queste considerazioni, la scelta di escludere la stufa elettrica è stata presa per preservare l'integrità delle condizioni di test nella camera climatica. L'introduzione di calore diretto alterava significativamente le condizioni interne, compromettendo la qualità dei risultati delle prove, specialmente nei punti di presa più vicini alla fonte di calore. Pertanto, per ottenere dati accurati e rappresentativi, è stato ritenuto necessario escludere l'uso della stufa elettrica, privilegiando metodi di riscaldamento che garantiscano un ambiente termicamente uniforme e controllato.

4.1.2 ER – Electric Radiator

I test sono stati eseguiti all'interno di una camera climatica riscaldata mediante un radiatore elettrico, mantenendo la trasmittanza termica del vetro della finestra a tre livelli costanti specificati. I valori di trasmittanza termica (U_w) considerati per le prove sono stati i seguenti:

- $U_w = 5 \text{ W / m}^2 \text{ K}$
- $U_w = 3 \text{ W / m}^2 \text{ K}$
- $U_w = 1 \text{ W / m}^2 \text{ K}$

Il radiatore elettrico, utilizzato per il riscaldamento della test room, ha garantito il mantenimento di una temperatura interna stabile. Questo ha permesso di valutare l'efficienza energetica del sistema di riscaldamento in relazione ai diversi livelli di trasmittanza termica del vetro, fornendo dati accurati sull'impatto della trasmittanza sulla performance termica complessiva.

Nel caso analizzato successivamente è stata fissata la trasmittanza del vetro della finestra a valore costante di:

$$U_w = \frac{5 \text{ W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Questo valore elevato di U_w indica una bassa capacità isolante delle finestre, suggerendo una significativa inefficienza dal punto di vista energetico.

In ambito scolastico, dove la qualità dell'ambiente interno (Indoor Environmental Quality, IEQ) è fondamentale per il benessere e le prestazioni degli studenti e del personale, un valore così elevato di trasmittanza termica comporta sia una significativa dispersione di calore dall'interno verso l'esterno, sia un'elevata immissione di freddo dall'esterno durante il periodo invernale. Tale situazione può compromettere gravemente il comfort termico e l'IEQ delle aule.

Le prove eseguite hanno considerato vari aspetti dell'Indoor Environmental Quality (IEQ), come la temperatura dell'aria, la temperatura operativa, la velocità dell'aria e il tasso di turbolenza (drought rate). La velocità dell'aria è un fattore cruciale per il comfort termico, poichè correnti d'aria eccessive possono causare disagio agli studenti. Il tasso di turbolenza, o drought rate, misura la percezione di freddo causata dalle correnti d'aria, anche in presenza di temperature relativamente elevate.

I test svolti nella camera climatica hanno simulato le condizioni ambientali tipiche di un periodo invernale, permettendo di misurare quanto efficacemente il termosifone riesca a mantenere la temperatura interna nonostante l'alto valore di trasmittanza termica delle finestre e di valutare l'effetto dei diversi tassi di ricambio d'aria sulla qualità ambientale interna. Questi dati sono essenziali per ottimizzare le strategie di riscaldamento e ventilazione e per migliorare l'efficienza energetica e il comfort termico degli spazi scolastici.

Air temperature (°C)

Le tabelle riportate (Tab. 13 e 14) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura dell'aria (°C) (Fig. 43) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione peggiore in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singolo a bassa prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

Osservando i gradienti termici verticali (Tab. 14), quindi la differenza di temperatura rilevata a 0,1 m e 1,1 m da terra nello stesso punto, si può verificare che sono tutti inferiori al limite di 3° C fissato dalla normativa UNI EN 7730.

Possiamo notare come, indipendentemente dall' aumento della velocità dei ricambi d'aria/ora, la condizione meno vantaggiosa, quindi la più fredda, è sempre quella con altezza uguale a $z = 0,1$ m. Quella più favorevole, quindi con temperature più alte, risulta essere sempre quella a $z = 1,1$ m. Si verifica una variazione di temperatura tra 0,1 m e 1,1 m di circa 1°C che va via via crescendo con l'aumentare della velocità dell'aria. Questo spiega il fenomeno della stratificazione delle temperature, dove l'aria calda, essendo più leggera di quella fredda, tende a salire verso il soffitto, mentre quella fredda ristagna a livello del pavimento.

In presenza di un vetro a scarse prestazioni e dunque ad alta trasmittanza, notiamo che, in corrispondenza della finestra e del termosifone, troviamo i punti con le maggiori differenze di temperatura. I punti 3 e 8, in corrispondenza del termosifone elettrico, risultano essere quasi sempre i più caldi in tutte e quattro le combinazioni e a tutte le altezze, mentre quelli subito adiacenti (punti di presa 2 e 4, 7 e 9) sono solitamente i più freddi perché influenzati da temperature più basse uscenti dal vetro. In particolare, con l'impianto di ventilazione meccanica spento, possiamo verificare dalla tabella (Tab. 13) una variazione delle temperature di circa 2,2°C nei vari punti sopra citati. Con l'impianto alla massima potenza di ventilazione, queste variazioni non risultano così alte, mostrando che la ventilazione meccanica contribuisce a ridurre le differenze di temperatura, migliorando la distribuzione del calore all'interno della stanza.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	18,81	19,55	20,44	18,56	19,54	20,40	18,38	19,20	20,07	18,02	18,79	19,70
2	17,78	18,98	19,43	18,65	19,54	20,35	17,65	18,78	19,18	17,80	18,47	19,03
3	20,16	20,55	20,98	19,10	19,26	19,53	19,05	19,05	19,59	19,74	19,94	20,46
4	17,55	18,50	18,75	17,87	18,90	19,37	17,59	18,56	18,82	18,56	19,10	20,21
5	18,08	19,23	19,96	18,07	19,54	20,57	18,34	19,66	20,57	18,05	19,59	20,66
6	17,67	18,68	19,27	18,15	19,15	20,06	18,57	19,58	20,62	18,67	19,68	20,87
7	17,66	18,68	19,25	17,54	18,60	19,08	19,04	19,75	20,82	18,06	18,75	19,62
8	19,30	19,63	20,09	19,60	20,05	20,82	18,46	18,51	19,01	19,03	19,07	19,90
9	18,25	19,07	19,95	17,84	18,78	19,63	18,19	18,85	19,58	17,65	18,62	19,36
10	18,63	19,87	20,76	18,17	19,45	20,39	18,43	19,76	20,62	17,79	19,22	20,04
11	18,43	18,99	19,41	19,13	19,31	20,21	18,63	18,86	19,56	18,36	18,47	19,25
12	18,31	18,64	19,21	18,37	18,63	19,38	19,35	19,94	20,99	18,74	19,21	20,28
13	19,12	19,51	20,57	18,38	18,45	19,21	19,39	19,68	20,80	19,11	19,54	20,71
ΔT (°C) max	2,62	2,06	2,23	2,06	1,60	1,74	1,80	1,43	2,18	2,10	1,47	1,84

Tabella 13 – Valori medi della temperatura dell'aria per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	ΔT_v (°C)	ΔT_v (°C)	ΔT_v (°C)	ΔT_v (°C)
1	1,63	1,84	1,70	1,68
2	1,65	1,71	1,53	1,23
3	0,81	0,43	0,54	0,71
4	1,20	1,50	1,23	1,65
5	1,88	2,51	2,23	2,61
6	1,60	1,91	2,05	2,20
7	1,58	1,53	1,79	1,56
8	0,79	1,22	0,55	0,86
9	1,70	1,78	1,39	1,71
10	2,14	2,23	2,19	2,25
11	0,97	1,08	0,94	0,89
12	0,90	1,01	1,64	1,53
13	1,45	0,83	1,41	1,60

Tabella 14 – Gradienti verticali della temperatura dell'aria per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

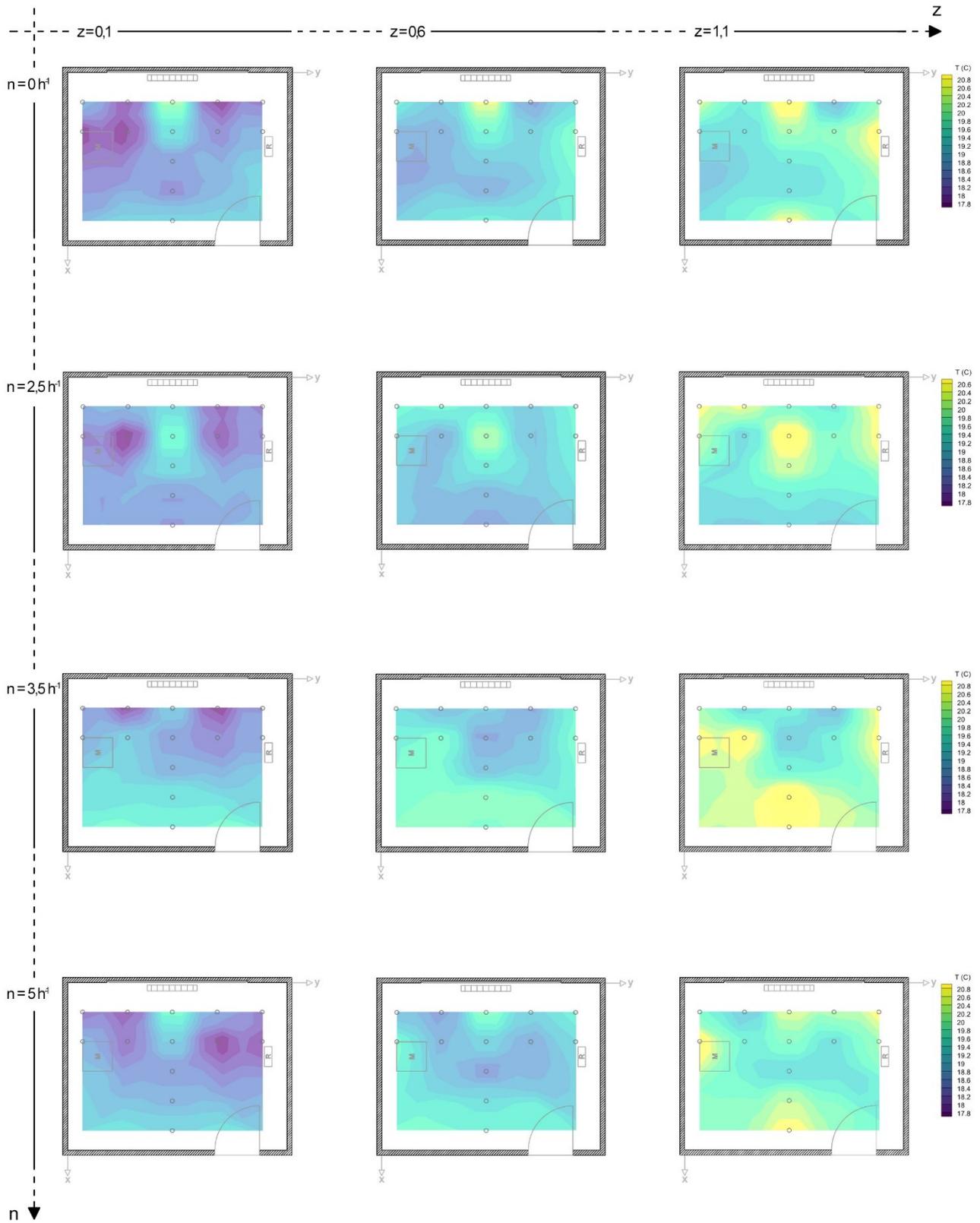


Fig.42. *Mapa del comfort della temperatura dell'aria (°C) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.*

Operative temperature (°C)

La temperatura operativa (°C) è stata registrata solamente ad un'altezza di 0,6 m da terra, data dalla posizione del sensore globo inclinato a 45°.

La tabella successivamente riportata (Tab. 15) contiene i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura operativa (°C) (Fig. 44) ad una altezza fissa di 0,6 m e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione peggiore in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singolo a bassa prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

I gradienti termici verticali in questo caso non possono essere verificati.

In presenza di un vetro con prestazioni termiche molto basse e dunque ad alta trasmittanza, si nota che i punti in corrispondenza della finestra e del termosifone presentano le maggiori differenze di temperatura. I punti 3 e 8, situati vicino al termosifone elettrico, risultano essere quasi sempre i più caldi in tutte e quattro le velocità del sistema di ventilazione meccanica. Tuttavia, nel caso di $n = 3,5 \text{ h}^{-1}$, il punto 8 risulta essere il più freddo. I punti di presa adiacenti a quelli più caldi (punti 2 e 4, 7 e 9) sono generalmente i più freddi, poiché influenzati dalle basse temperature derivanti dal vetro poco prestante.

Con l'impianto di ventilazione alla massima potenza, la differenza di temperatura tra il valore più alto e quello più basso nei 13 punti di presa è di circa 3,5°C. Questo evidenzia come il tipo di riscaldamento influenzi significativamente la distribuzione del calore interno, superando persino l'effetto della ventilazione meccanica.

	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
		0,6		0,6		0,6		0,6
1		19,34		19,53		19,10		18,62
2		18,47		19,12		18,43		18,27
3		21,87		21,25		19,29		21,73
4		18,09		18,22		18,15		19,23
5		19,16		19,33		19,50		19,17
6		18,83		19,40		19,60		19,78
7		18,50		18,54		20,09		19,06
8		19,36		20,56		18,45		19,09
9		18,90		18,58		19,14		18,37
10		19,63		19,17		19,46		18,80
11		18,81		19,25		19,33		18,48
12		18,90		18,69		20,17		19,47
13		19,93		18,79		19,74		19,55
Δ T (°C) max		3,78		3,03		2,02		3,46

Tabella 15 – Valori medi della temperatura operativa per i 13 punti di presa a 0,6 m di altezza al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

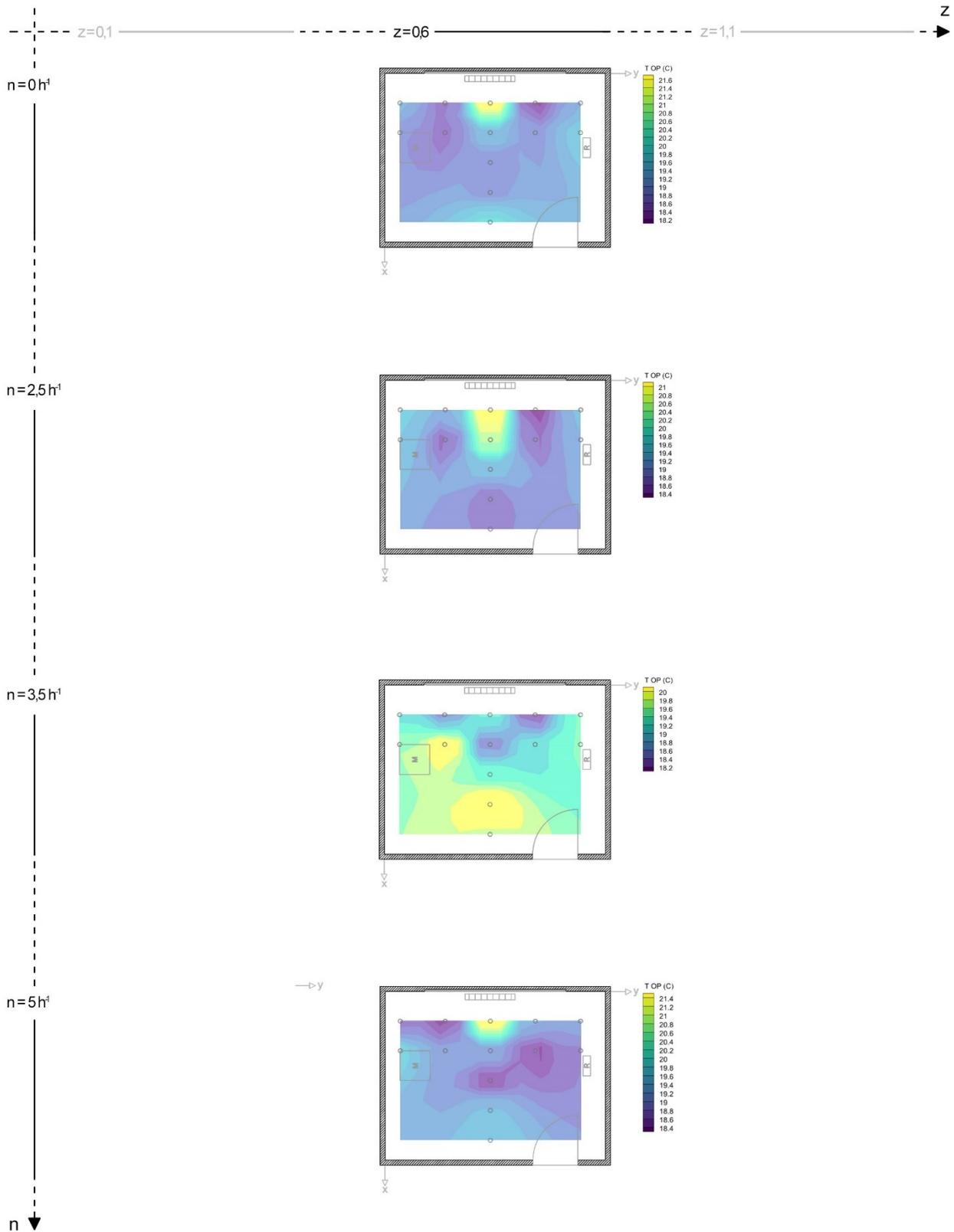


Fig.43. *Mappa del comfort della temperatura operativa ($^{\circ}\text{C}$) a 0,6 m di altezza al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.*

Air Velocity (m/s)

Le tabelle riportate (Tab. 16 e 17) contengono i dati numerici che sono stati rappresentati graficamente nella mappatura della velocità dell'aria (m/s) (Fig. 45) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione peggiore in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singolo a bassa prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

È evidente che, indipendentemente dall'aumento della velocità dei ricambi d'aria per ora, il flusso d'aria con le velocità maggiori si rileva sempre a un'altezza di 0,1 m. Al contrario, le velocità più basse si registrano costantemente a un'altezza di 1,1 m. Ad esempio, si osserva una variazione di velocità massima (valori segnati in rosso, Tab. 16) dell'aria tra 0,1 m e 1,1 m di circa 0,08 m/s con $n = 0 \text{ h}^{-1}$, una differenza che cresce ulteriormente con l'aumentare della velocità del sistema di ventilazione meccanica.

In presenza di un vetro a basse prestazioni, e quindi ad alta trasmittanza, notiamo che, a qualsiasi velocità del sistema di ventilazione meccanica, si verificano dei picchi di velocità molto più elevati nella zona più vicina alla finestra, soprattutto all'altezza piedi, quindi $z = 0,1 \text{ m}$. Questo crea mappe disomogenee e quindi zone di dis-comfort. Tuttavia, con l'aumentare dell'altezza (z), questi picchi diventano sempre meno presenti, contribuendo a distribuire la velocità dell'aria in maniera più uniforme all'interno della camera di prova.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	0,066	0,037	0,025	0,042	0,077	0,037	0,049	0,026	0,023	0,048	0,029	0,021
2	0,082	0,025	0,020	0,076	0,025	0,021	0,096	0,022	0,019	0,063	0,025	0,039
3	0,053	0,029	0,022	0,063	0,028	0,035	0,093	0,094	0,050	0,071	0,033	0,026
4	0,089	0,023	0,020	0,111	0,023	0,021	0,086	0,022	0,017	0,046	0,022	0,016
5	0,113	0,028	0,015	0,102	0,032	0,017	0,100	0,021	0,016	0,143	0,023	0,019
6	0,059	0,023	0,034	0,035	0,023	0,032	0,056	0,029	0,022	0,034	0,024	0,039
7	0,084	0,023	0,021	0,094	0,022	0,019	0,057	0,024	0,019	0,052	0,024	0,022
8	0,059	0,029	0,022	0,038	0,026	0,021	0,062	0,044	0,022	0,055	0,047	0,024
9	0,082	0,035	0,021	0,099	0,029	0,022	0,054	0,028	0,017	0,086	0,030	0,025
10	0,089	0,027	0,020	0,071	0,027	0,021	0,080	0,025	0,021	0,105	0,027	0,023
11	0,059	0,027	0,022	0,042	0,031	0,022	0,039	0,024	0,017	0,044	0,031	0,021
12	0,049	0,030	0,020	0,048	0,030	0,022	0,028	0,021	0,019	0,029	0,022	0,023
13	0,035	0,021	0,017	0,037	0,023	0,020	0,037	0,026	0,024	0,036	0,025	0,045
ΔV (m/s) max	0,078	0,016	0,019	0,075	0,055	0,020	0,072	0,072	0,034	0,114	0,025	0,029

Tabella 16 – Valori medi della velocità dell'aria per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	ΔV_v (m/s)	ΔV_v (m/s)	ΔV_v (m/s)	ΔV_v (m/s)
1	-0,040	-0,005	-0,026	-0,027
2	-0,063	-0,055	-0,077	-0,024
3	-0,031	-0,028	-0,043	-0,045
4	-0,069	-0,089	-0,069	-0,029
5	-0,098	-0,085	-0,085	-0,123
6	-0,026	-0,003	-0,035	0,006
7	-0,063	-0,074	-0,038	-0,031
8	-0,037	-0,017	-0,040	-0,031
9	-0,061	-0,076	-0,037	-0,061
10	-0,068	-0,050	-0,059	-0,082
11	-0,036	-0,021	-0,022	-0,022
12	-0,029	-0,026	-0,010	-0,006
13	-0,018	-0,016	-0,013	0,009

Tabella 17 – Gradienti verticali della velocità dell'aria per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

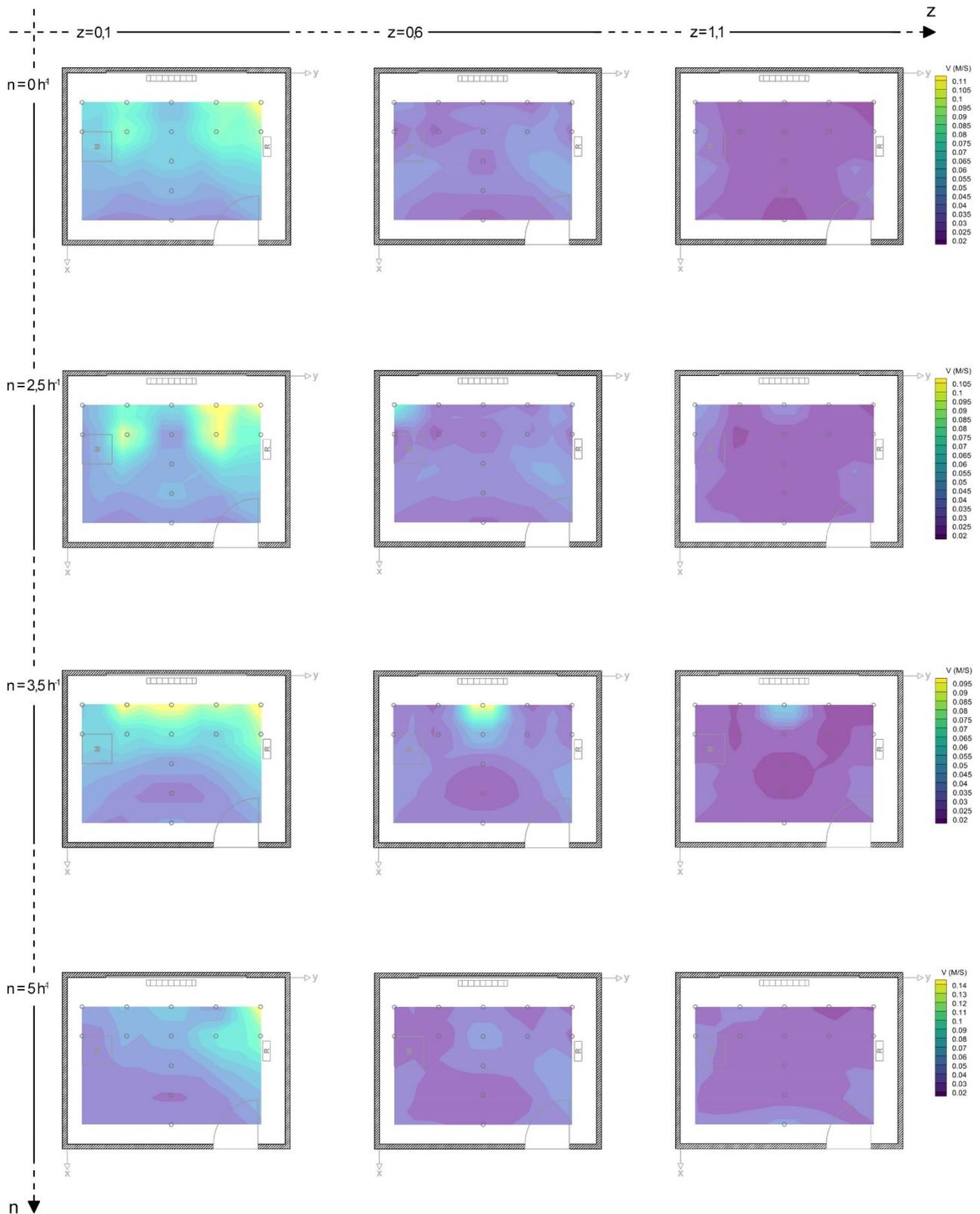


Fig.44. Mappa del comfort della velocità dell'aria (m/s) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Draught Rate (%)

Le tabelle riportate (Tab. 18 e 19) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura del draught rate (%) (Fig. 46) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione peggiore in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singolo a bassa prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

Osservando i gradienti verticali del draught rate (tab n x), ovvero la differenza di correnti d'aria rilevate a 0,1 m e 1,1 m da terra nello stesso punto, si nota che tutti i valori sono inferiori al limite del 15% fissato dalla normativa UNI EN 7730, tranne il punto di presa 5 per $n = 5 \text{ h}^{-1}$ (valore segnato in rosso, Tab. 19).

Indipendentemente dall'aumento della velocità dei ricambi d'aria/ora del sistema meccanico di ventilazione, la condizione meno vantaggiosa, quindi con valori di draught rate maggiori, è sempre quella con altezza uguale a $z = 0,1 \text{ m}$. Questo indica una maggiore sensibilità al draught rate vicino al pavimento.

La variazione del discomfort termico medio tra 0,1 m e 1,1 m è di circa il 10,5%, e questo valore aumenta con l'aumentare della velocità del sistema meccanico di ventilazione. Tale dato evidenzia un incremento del discomfort con l'aumento della ventilazione, particolarmente nella zona dei piedi.

Al crescere dell'altezza ($z = 0,6 \text{ m}$ e $z = 1,1 \text{ m}$), i valori di picco del draught rate diminuiscono gradualmente, portando a una situazione di comfort termico più omogenea. Tuttavia, questa omogeneità corrisponde a correnti d'aria quasi nulle.

Con un vetro a basse prestazioni termiche e quindi ad alta trasmittanza, i punti più vicini alle bocchette di mandata e ripresa del sistema di ventilazione meccanica presentano valori di draught rate più elevati in tutte le combinazioni di velocità e quasi a tutte le altezze. In particolare, per tutte le velocità del sistema di ventilazione meccanica controllata, il punto di presa 5 mostra essere quasi sempre quello con il valore maggiore di draught rate, tranne nel caso di $n = 2,5 \text{ h}^{-1}$, dove il punto 4 (adiacente al punto 5) risulta leggermente superiore.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	4,305	0,623	0,137	1,312	5,544	0,722	2,155	0,000	0,104	1,887	0,130	0,087
2	7,427	0,000	0,000	6,261	0,000	0,083	9,570	0,000	0,000	4,835	0,063	1,801
3	1,913	0,047	0,000	3,450	0,223	0,165	7,718	7,886	2,640	4,526	0,279	0,261
4	9,089	0,084	0,043	11,588	0,020	0,000	8,369	0,055	0,000	2,398	0,000	0,000
5	11,835	0,550	0,000	10,225	1,065	0,000	9,915	0,080	0,000	15,990	0,000	0,000
6	3,268	0,000	1,139	0,499	0,091	0,962	2,794	0,048	0,000	0,232	0,060	1,227
7	7,329	0,070	0,000	8,388	0,000	0,000	2,842	0,000	0,000	2,525	0,128	0,305
8	2,727	0,211	0,000	0,283	0,103	0,000	3,889	1,436	0,000	2,291	1,772	0,016
9	6,454	0,028	0,000	9,262	0,008	0,000	3,135	0,009	0,000	7,728	0,000	0,062
10	7,610	0,057	0,000	5,862	0,207	0,000	6,645	0,032	0,000	10,435	0,039	0,000
11	3,380	0,000	0,000	0,984	0,221	0,000	0,444	0,038	0,000	1,009	0,267	0,063
12	2,024	0,176	0,000	1,851	0,025	0,000	0,015	0,000	0,000	0,023	0,000	0,091
13	0,086	0,000	0,000	0,803	0,220	0,195	0,267	0,000	0,052	0,374	0,085	1,890
Δ DR (%) max	11,749	0,623	1,139	11,306	5,544	0,962	9,900	7,886	2,640	15,967	1,772	1,890

Tabella 18– Valori medi del draught rate per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)
1	-4,168	-0,590	-2,051	-1,801
2	-7,427	-6,177	-9,570	-3,034
3	-1,913	-3,285	-5,078	-4,265
4	-9,046	-11,588	-8,369	-2,398
5	-11,835	-10,225	-9,915	-15,990
6	-2,129	0,463	-2,794	0,995
7	-7,329	-8,388	-2,842	-2,220
8	-2,727	-0,283	-3,889	-2,275
9	-6,454	-9,262	-3,135	-7,665
10	-7,610	-5,862	-6,645	-10,435
11	-3,380	-0,984	-0,444	-0,946
12	-2,024	-1,851	-0,015	0,068
13	-0,086	-0,608	-0,215	1,516

Tabella 19– Gradienti verticali del draught rate per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

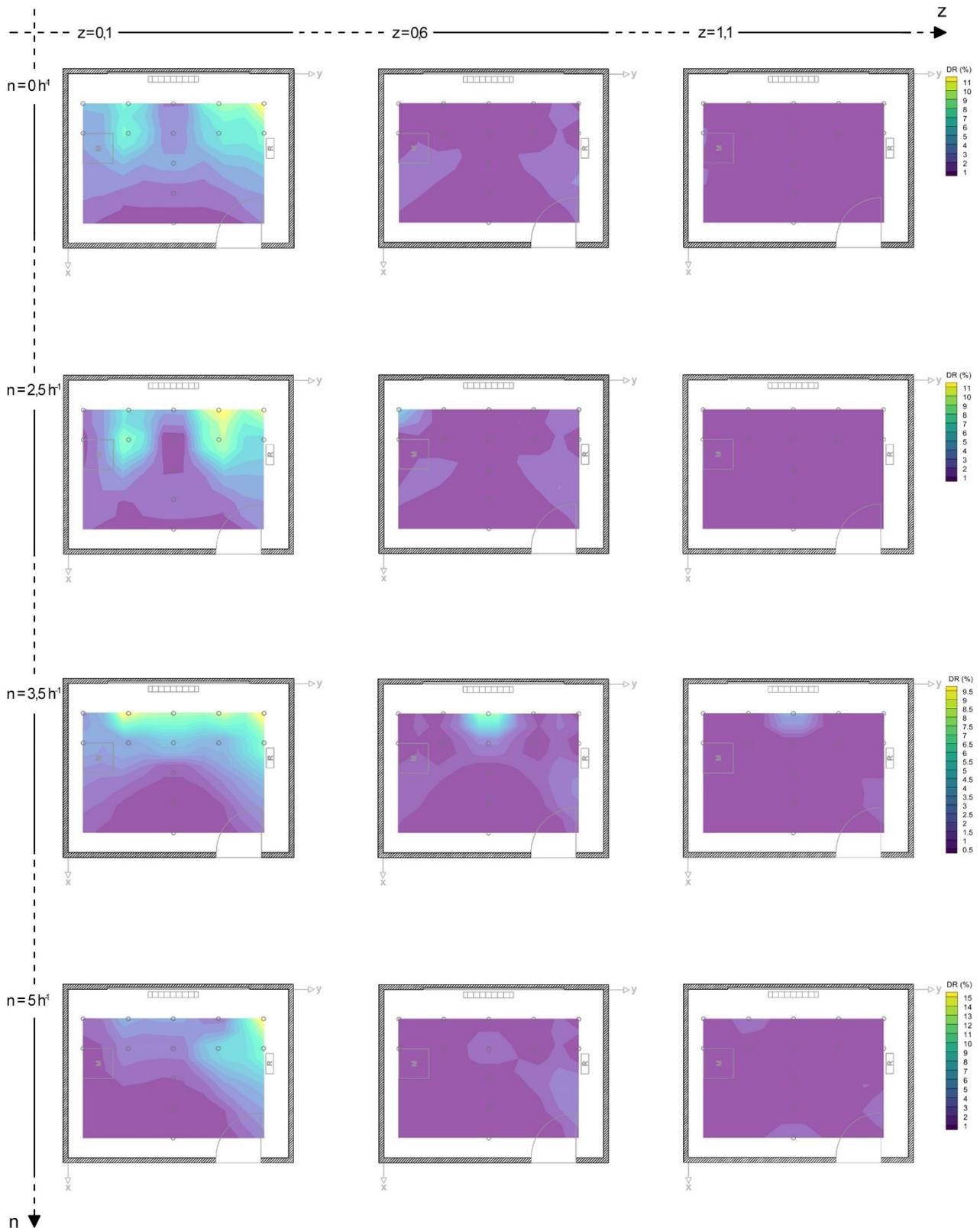


Fig.45. *Mappa del comfort del draght rate (%) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.*

Manichino termico

La tabella (Tab. 20) riporta la media dei dati acquisiti dalle 27 zone anatomiche del manichino termico, suddivise in tre macroaree del corpo, corrispondenti ai tre punti di rilevamento della ComfortSense Dantec (0,1 m, 0,6 m, 1,1 m). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione più critica in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro singolo a bassa efficienza termica. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

Le tabelle riportate contengono i dati numerici rappresentati nei grafici della temperatura equivalente (Fig. 47 e 48) rilevata a tre altezze (z).

Posizionando il manichino nel punto di rilevamento 3, situato di fronte alla stufa ad una distanza di 60 cm, si osserva una diminuzione della temperatura (Fig. 47) in tutte e 27 le zone misurate, passando dal sistema meccanico di ventilazione spento fino alla massima potenza. Nella zona dalla coscia posteriore destra fino al fondo schiena destro le temperature restano quasi tutte invariate. Quando il manichino è posizionato nel punto di rilevamento 8, a una distanza di 120 cm dalla stufa, si osserva una variazione delle temperature (Fig. 48) in tutte le zone misurate, passando dal sistema meccanico di ventilazione spento fino alla massima potenza.

In entrambe le posizioni di rilevamento (punto 3 e punto 8), le temperature più elevate sono state registrate nella zona del fondo schiena sinistro, con valori che raggiungono circa 32,3°C nel punto 3 e 31,9°C nel punto 8. Si osserva una differenza di circa mezzo grado tra le due posizioni, entrambe raggiungono le temperature massime ad una velocità dei ricambi d'aria/ora a $n = 0 \text{ h}^{-1}$. Le temperature più basse sono state rilevate in corrispondenza della mano sinistra, con valori di circa 23,9°C per il punto 3 e circa 24,1°C per il punto 8, entrambe per $n = 5 \text{ h}^{-1}$, con una variazione tra esse di 0,2°C.

I dati acquisiti dimostrano chiaramente l'impatto del sistema di riscaldamento e la posizione del manichino.

Per quanto riguarda il PMV (Tab. 21), ci troviamo in una situazione quasi omogenea per tutte e quattro le condizioni dei ricambi d'aria/ora, che indica una percezione di moderato caldo.

Relativamente il PPD (Tab. 21), la percentuale di insoddisfatti è più alta quando il sistema di ventilazione è spento, circa il 40% nel punto 3. Questa percentuale diminuisce con l'incremento della velocità del sistema di ventilazione meccanica, raggiungendo un minimo del 20,2% con $n = 5 \text{ h}^{-1}$.

	n	Parti Corpo	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
			T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8
0,1	1	L. Foot	30,69	28,42	29,60	29,60	28,87	27,82	28,32	27,49
	2	R. Foot	29,38	28,57	29,07	29,07	28,79	28,43	28,60	28,35
	3	L. Foreleg	30,60	27,97	29,05	29,05	28,19	27,40	27,62	27,17
	4	R. Foreleg	28,33	27,97	27,91	27,91	27,52	27,80	27,20	27,63
0,6	5	L. Front Thigh	30,06	29,21	28,47	28,47	27,65	28,47	27,36	28,24
	6	R. Front Thigh	27,79	28,10	27,54	27,54	27,31	27,95	27,20	27,80
	7	L. Back Thigh	31,38	30,36	30,77	30,77	30,24	30,14	29,90	30,01
	8	R. Back thigh	30,06	30,22	30,10	30,10	30,09	30,23	29,98	30,14
	9	Pelvis	31,55	32,64	31,66	31,66	31,70	32,61	31,73	32,58
	20	Backside	31,46	32,03	31,59	31,59	31,60	32,00	31,60	32,00
	25	Back L.Down	32,29	31,95	32,25	32,25	32,14	31,87	32,08	31,73
	23	Back R. Down	31,99	31,87	32,17	32,17	32,20	31,82	32,20	31,80
	13	L. Hand	27,43	25,70	25,50	25,50	24,37	24,55	23,98	24,12
	14	R. Hand	26,61	25,90	26,18	26,18	25,75	25,57	25,48	25,37
	15	L. Forearm	29,73	27,64	28,09	28,09	27,20	26,74	26,73	26,42
	16	R. Forearm	28,50	28,45	28,36	28,36	28,17	28,23	28,07	28,11
	21	Stomach L.	29,20	29,06	28,64	28,64	28,25	28,65	28,05	28,50
27	Stomach R.	29,60	29,53	29,44	29,44	29,34	29,43	29,21	29,36	
1,1	17	L. Upper arm	28,19	28,46	27,61	27,61	27,10	27,82	26,99	27,65
	18	R. Upper arm	29,75	29,70	29,63	29,63	29,50	29,57	29,44	29,50
	19	Chest L.	27,88	28,09	27,38	27,38	26,99	27,67	26,88	27,59
	26	Chest R.	28,72	28,46	28,41	28,41	28,19	28,40	28,10	28,32
	12	Back L. Up	28,62	28,83	28,42	28,42	28,18	28,56	28,10	28,47
	22	Back R. Up	28,90	29,05	28,73	28,73	28,50	28,85	28,40	28,77
	10	L. Face	25,90	25,97	24,99	24,99	24,42	24,90	24,30	24,59
	24	R. Face	27,72	26,97	27,35	27,35	26,93	26,75	26,76	26,51
	11	Skull	28,45	28,43	28,08	28,08	27,70	28,02	27,51	27,83

Tabella 20 – Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nei punti 3 ed 8, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8
PMV	1,27	1,09	1,08	1,05	0,93	0,98	0,85	0,90
PPD (%)	39,12	30,15	29,37	28,16	23,21	24,82	20,20	22,42

Tabella 21 – Valori medi PMV e PPD per i due punti di presa, 3 ed 8, al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

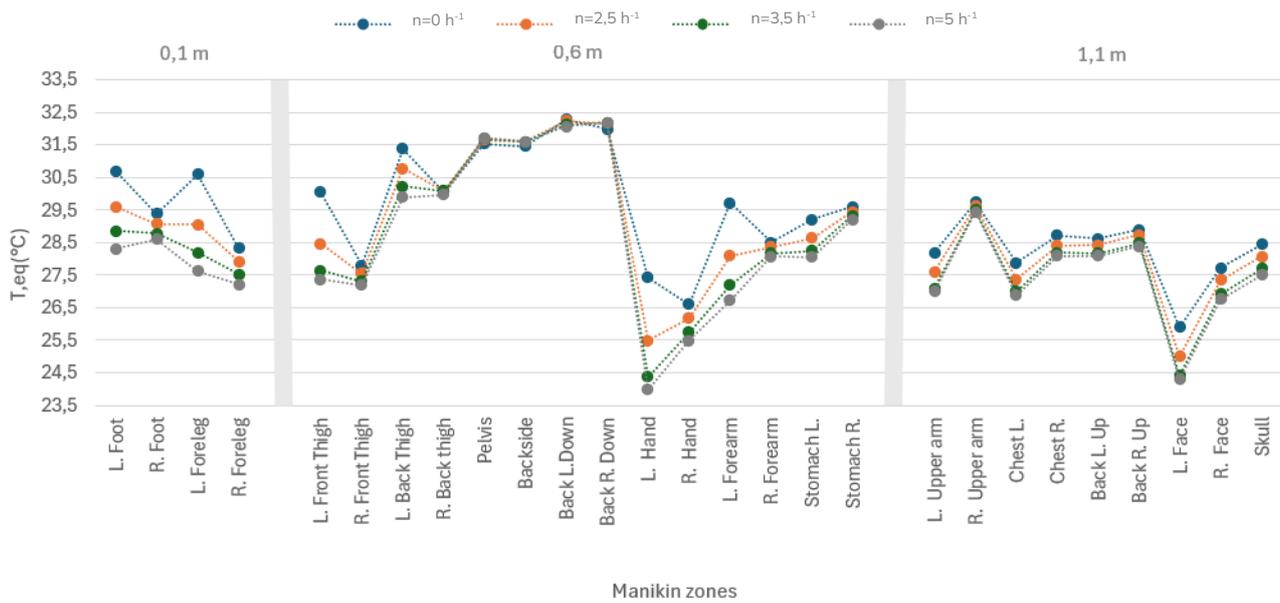


Fig.46. Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nel punto di presa 3, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

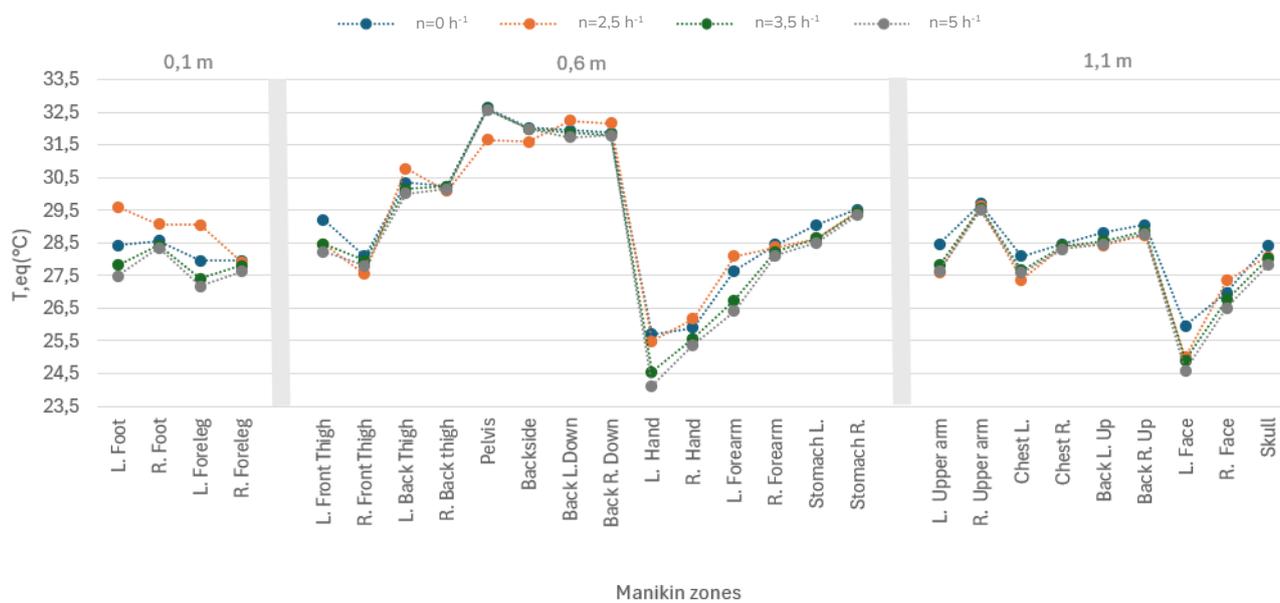


Fig.47. Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nel punto di presa 8, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Nel caso approfondito in seguito, la trasmittanza termica U_w del vetro della finestra è stata impostata ad un valore pari a:

$$U_w = \frac{3 \text{ W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Questo valore ridotto indica un miglioramento nella capacità isolante rispetto a configurazioni precedenti, suggerendo una diminuzione dell'inefficienza energetica. In ambienti educativi, dove il comfort termico e la qualità dell'ambiente interno (Indoor Environmental Quality, IEQ) sono fondamentali per il benessere e le prestazioni di studenti e personale, una trasmittanza termica inferiore contribuisce a ridurre la dispersione di calore verso l'esterno e l'ingresso di freddo dall'esterno durante il periodo invernale. Di conseguenza, si prevede un miglioramento significativo del comfort termico e dell'IEQ delle aule.

I test hanno permesso di replicare le condizioni ambientali tipiche del periodo invernale, consentendo di osservare come l'abbassamento del valore di trasmittanza termica delle finestre influisca positivamente sulla riduzione della dispersione di calore e sulla limitazione dell'infiltrazione di aria fredda dall'esterno. Questo approccio sperimentale ha fornito dati preziosi sulla capacità del termosifone elettrico di contrastare efficacemente le perdite di calore, garantendo una temperatura interna stabile e confortevole.

L'analisi dei risultati ottenuti dai test ha rivelato che, con una trasmittanza termica inferiore, il termosifone elettrico può operare in maniera più efficiente, riducendo il consumo energetico complessivo e migliorando il comfort termico all'interno della camera climatica. Questo miglioramento è cruciale per gli ambienti scolastici, dove il mantenimento di condizioni termiche ottimali è essenziale per il benessere psicofisico degli studenti e del personale. Un IEQ migliorato si traduce in un ambiente di apprendimento più favorevole, riducendo i potenziali disagi causati da temperature estreme e contribuendo a un'esperienza educativa più positiva.

Air temperature (°C)

Le tabelle successivamente riportate (Tab. 22 e 23) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura dell'aria (°C) (Fig. 49) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione intermedia in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un doppio vetro con intercapedine; quindi, non molto prestante termicamente. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

Osservando i gradienti termici verticali (Tab. 23), quindi la differenza di temperatura rilevata a 0,1 m e 1,1 m da terra nello stesso punto, si può verificare che sono tutti inferiori al limite di 3° C fissato dalla normativa UNI EN 7730. Questo indica che la distribuzione della temperatura verticale rientra nei limiti di comfort previsti dalla normativa.

Possiamo notare come, indipendentemente dall' aumento della velocità dei ricambi d'aria/ora, la condizione meno favorevole (più fredda) si verifica sempre a un'altezza di $z = 0,1$ m, mentre la condizione più favorevole (più calda) si trova sempre a $z = 1,1$ m. La variazione di temperatura tra queste due altezze è di circa 1,3°C. Questo fenomeno può essere spiegato con la stratificazione delle temperature: l'aria calda, essendo più leggera, tende a salire verso il soffitto, mentre quella fredda ristagna vicino al pavimento.

In questo caso, a differenza di quanto visto precedentemente con un vetro ad alte prestazioni e dunque a bassa trasmittanza, notiamo che, all'aumentare della velocità ora del sistema di ricircolo dell'aria la temperatura all'interno della test-room risulta più disomogenea nei vari punti. I punti in corrispondenza delle bocchette di mandata (punti di presa 6 e 7) e risultano essere i più freddi ad impianto spento, ma al crescere della velocità dell'aria dell'impianto, tendono ad aumentare fino ad essere i più caldi.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	19,57	20,16	20,83	19,42	19,98	20,58	18,88	19,34	19,60	18,59	19,19	19,36
2	19,24	19,97	20,31	18,97	19,77	20,07	18,54	19,28	19,40	18,36	19,13	19,25
3	19,35	19,16	19,22	18,89	19,21	19,50	19,92	19,96	20,20	18,51	19,20	19,31
4	18,87	19,72	19,96	18,66	19,49	19,68	18,35	19,15	19,27	18,26	19,04	19,15
5	18,57	19,64	19,88	18,34	19,36	19,55	18,35	19,27	19,42	18,25	19,15	19,23
6	18,45	19,23	19,37	19,70	20,50	21,16	18,53	19,25	19,41	19,66	20,44	21,17
7	18,45	19,29	19,50	19,78	20,30	21,13	18,40	19,19	19,43	19,98	20,60	21,33
8	19,08	19,25	19,28	18,56	19,01	19,29	19,75	19,81	20,09	18,50	19,21	19,34
9	18,68	19,37	19,65	18,92	19,37	19,79	18,43	19,14	19,47	19,36	19,87	20,41
10	18,73	19,58	19,73	18,38	19,12	19,41	18,38	19,32	19,46	18,37	19,19	19,33
11	19,01	19,25	19,45	18,88	19,13	19,55	19,40	19,69	19,96	18,50	19,21	19,45
12	19,68	20,05	20,83	19,57	20,04	20,86	19,28	19,55	19,84	18,59	19,13	19,47
13	20,04	20,47	21,30	19,83	20,24	21,06	19,26	19,40	19,72	18,73	19,18	19,50
Δ T (°C) max	1,59	1,31	2,08	1,49	1,49	1,87	1,57	0,82	0,93	1,73	1,56	2,18

Tabella 22 – Valori medi della temperatura dell'aria per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	Δ Tv (°C)	Δ Tv (°C)	Δ Tv (°C)	Δ Tv (°C)
1	1,25	1,16	0,71	0,77
2	1,07	1,10	0,86	0,90
3	-0,13	0,62	0,28	0,80
4	1,09	1,02	0,92	0,89
5	1,31	1,21	1,07	0,98
6	0,92	1,46	0,88	1,51
7	1,05	1,34	1,03	1,35
8	0,20	0,74	0,34	0,84
9	0,96	0,86	1,04	1,05
10	1,00	1,03	1,08	0,96
11	0,44	0,67	0,56	0,95
12	1,14	1,29	0,57	0,88
13	1,25	1,23	0,45	0,76

Tabella 23 – Gradienti verticali della temperatura dell'aria per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

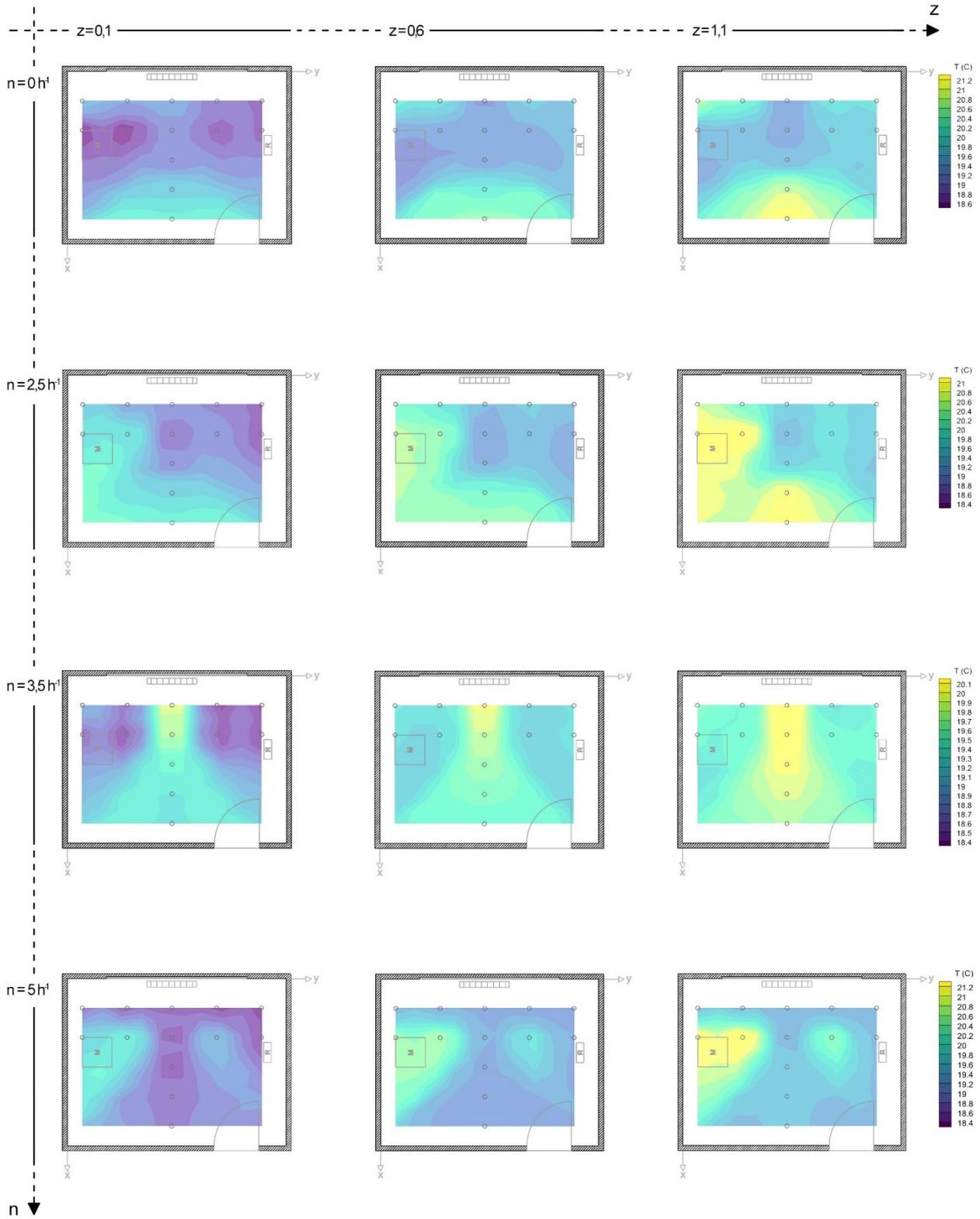


Fig.48. *Mappa del confort della temperatura dell'aria (°C) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3W/m^2K$.*

Operative temperature (°C)

La temperatura operativa (°C) è stata registrata esclusivamente ad un'altezza di 0,6 m da terra, utilizzando un sensore globo inclinato a 45°.

La tabella successivamente riportata (Tab. 24) contiene i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura operativa (°C) (Fig. 50) ad una altezza fissa di 0,6 m e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione intermedia in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un doppio vetro con intercapedine; quindi, con prestazioni termiche non particolarmente elevate. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

In presenza di un vetro con prestazione termiche intermedie, si osserva come non vi sia una corrispondenza significativa tra le aree più calde e quelle più fredde, indipendentemente dalle quattro diverse velocità del ricambio d'aria, all'interno della camera di prova. Con il sistema di ventilazione spento, le aree con temperature basse sono più estese (Fig. 50). Tuttavia, con l'aumento della velocità di ricambio dell'aria all'ora, queste aree diventano meno concentrate, con una distribuzione più omogenea della temperatura, sebbene le variazioni di temperatura tra i 13 punti di rilevazione aumentino leggermente.

Con l'impianto di ventilazione meccanica spento, la differenza di temperatura tra il valore più alto e quello più basso nei 13 punti di presa è di circa 1,3°C. Quando l'impianto di ventilazione meccanica è alla massima potenza la differenza tra i valori sale a circa 2°C. Questo ci dimostra che una maggiore ventilazione contribuisce a una distribuzione più uniforme del calore, ma accentua le differenze di temperatura tra i punti di rilevazione. Le prestazioni termiche intermedie del vetro non consentono un isolamento termico ottimale, causando variazioni significative di temperatura al variare della velocità del ricambio d'aria.

	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
		0,6		0,6		0,6		0,6
1		20,03		19,81		19,42		19,25
2		19,66		19,44		19,14		18,99
3		19,26		19,13		20,10		18,94
4		19,29		19,06		18,90		18,77
5		19,38		19,10		19,16		18,91
6		19,25		20,42		19,36		20,36
7		19,18		20,74		19,26		20,71
8		19,19		18,95		19,70		19,07
9		19,25		19,64		19,17		20,31
10		19,46		19,15		19,27		19,09
11		19,42		19,43		19,59		19,35
12		20,50		20,40		19,62		19,46
13		20,54		20,27		19,59		19,44
Δ T (°C) max		1,35		1,79		1,20		1,94

Tabella 24 – Valori medi della temperatura operativa per i 13 punti di presa a 0,6 m di altezza al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

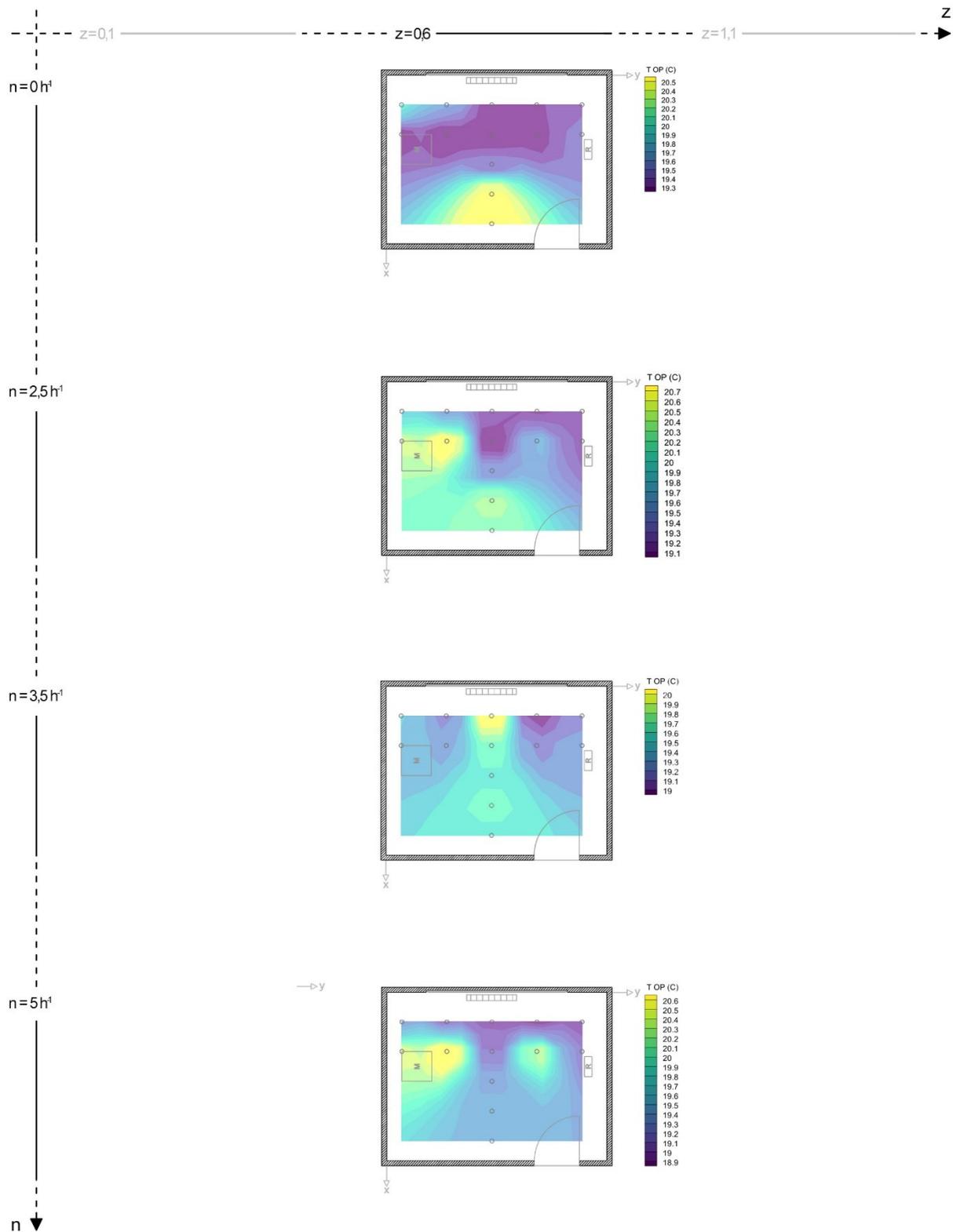


Fig.49. Mappa del comfort della temperatura operativa (°C) a 0,6 m di altezza al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Air Velocity (m/s)

Le tabelle riportate (Tab. 25 e 26) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura operativa (m/s) (Fig. 51) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione intermedia in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un doppio vetro con intercapedine; quindi, con prestazioni termiche non particolarmente elevate. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

È evidente che, indipendentemente dall'aumento della velocità dei ricambi d'aria per ora, il flusso d'aria con le velocità maggiori si rileva sempre a un'altezza di 0,1 m (Tab. 25). Al contrario, le velocità più basse si registrano costantemente a un'altezza di 1,1 m.

Alla quota di 0,1 m, la velocità dell'aria risulta generalmente più alta rispetto alle altre altezze. Questo perché l'aria calda tende a salire, creando un flusso più turbolento vicino al pavimento, dove il riscaldatore elettrico potrebbe influenzare maggiormente la velocità dell'aria. A 1,1 m, la velocità dell'aria è costantemente la più bassa, probabilmente perché si trova al livello più alto della stanza, dove l'aria ha già perso parte della sua energia cinetica e la turbolenza è minore.

Aumentando la velocità dei ricambi d'aria, si osserva una riduzione generale delle variazioni di velocità dell'aria a tutte le altezze. Questo è dovuto al fatto che un incremento dei ricambi d'aria comporta una maggiore omogeneizzazione del flusso d'aria nella camera di prova. La velocità dell'aria è maggiormente influenzata dalla posizione verticale nella stanza e dalla velocità dei ricambi d'aria.

Si osserva una variazione di velocità massima dell'aria tra 0,1 m e 1,1 m di circa 0,06 m/s con $n = 0 \text{ h}^{-1}$, una differenza che diminuisce con l'aumentare della velocità del sistema di ventilazione meccanica, fino ad arrivare a circa 0,05 m/s con $n = 5 \text{ h}^{-1}$.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	0,045	0,033	0,023	0,040	0,026	0,025	0,046	0,023	0,022	0,039	0,025	0,028
2	0,060	0,024	0,021	0,069	0,025	0,022	0,062	0,025	0,021	0,073	0,021	0,019
3	0,069	0,086	0,059	0,036	0,028	0,030	0,063	0,073	0,078	0,067	0,025	0,021
4	0,071	0,023	0,023	0,083	0,022	0,023	0,078	0,026	0,024	0,077	0,023	0,020
5	0,118	0,024	0,021	0,107	0,022	0,024	0,094	0,024	0,024	0,093	0,026	0,023
6	0,052	0,022	0,028	0,044	0,031	0,026	0,042	0,024	0,026	0,046	0,028	0,041
7	0,062	0,024	0,024	0,038	0,023	0,021	0,064	0,024	0,022	0,038	0,025	0,029
8	0,045	0,025	0,020	0,047	0,023	0,021	0,050	0,037	0,021	0,053	0,022	0,023
9	0,053	0,026	0,022	0,040	0,021	0,018	0,062	0,028	0,022	0,027	0,023	0,025
10	0,060	0,023	0,027	0,073	0,021	0,024	0,081	0,025	0,023	0,069	0,022	0,020
11	0,039	0,022	0,019	0,033	0,023	0,018	0,047	0,022	0,023	0,066	0,023	0,023
12	0,028	0,022	0,017	0,034	0,025	0,020	0,044	0,025	0,022	0,060	0,028	0,024
13	0,030	0,026	0,022	0,032	0,025	0,022	0,036	0,028	0,021	0,051	0,020	0,020
Δ V (m/s) max	0,090	0,065	0,042	0,075	0,010	0,012	0,058	0,051	0,057	0,067	0,008	0,022

Tabella 25 – Valori medi della velocità dell'aria per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	Δ Vv (m/s)	Δ Vv (m/s)	Δ Vv (m/s)	Δ Vv (m/s)
1	-0,022	-0,015	-0,024	-0,011
2	-0,039	-0,048	-0,040	-0,054
3	-0,010	-0,006	0,015	-0,046
4	-0,047	-0,060	-0,054	-0,057
5	-0,096	-0,083	-0,070	-0,071
6	-0,024	-0,018	-0,016	-0,005
7	-0,039	-0,017	-0,042	-0,010
8	-0,025	-0,026	-0,029	-0,031
9	-0,031	-0,022	-0,041	-0,002
10	-0,033	-0,049	-0,058	-0,048
11	-0,020	-0,015	-0,024	-0,043
12	-0,011	-0,014	-0,022	-0,036
13	-0,008	-0,011	-0,015	-0,031

Tabella 26 – Gradienti verticali della velocità dell'aria per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

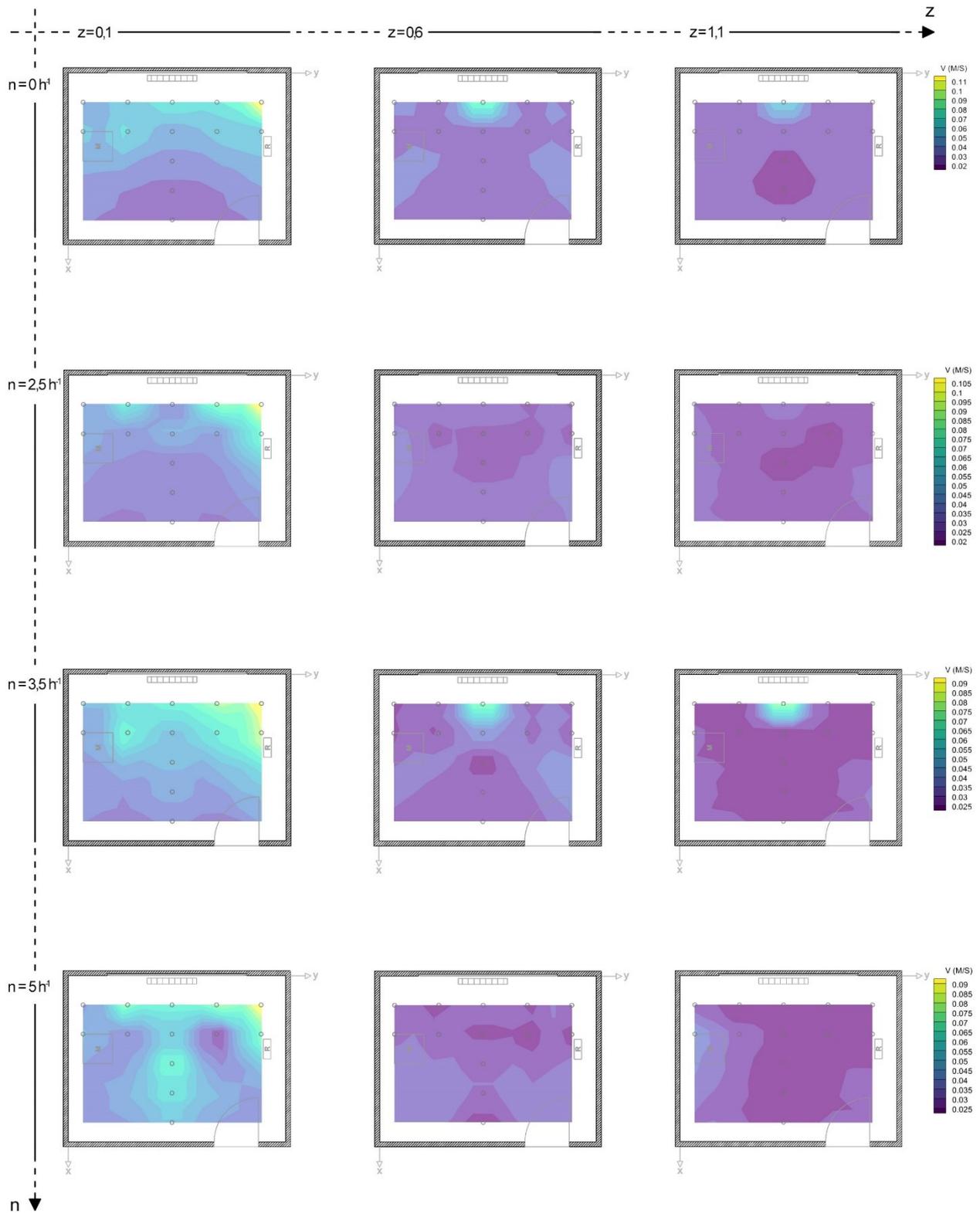


Fig.50. Mappa del comfort della velocità dell'aria (m/s) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Draught Rate (%)

Le tabelle riportate (Tab. 27 e 28) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura del draught rate (%) (Fig. 52) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione intermedia in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un doppio vetro con intercapedine; quindi, con prestazioni termiche non particolarmente elevate. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

Osservando i gradienti verticali (Tab. 28) del draught rate, ovvero la differenza di correnti d'aria rilevate a 0,1 m e 1,1 m dal suolo nello stesso punto, si nota che tutti i valori sono inferiori al limite del 15% stabilito dalla normativa UNI EN 7730. Questo rappresenta un risultato positivo in termini di comfort ambientale. Il punto di presa 5, situato vicino alla finestra e alla bocchetta di ripresa del sistema di ventilazione, mostra sempre gradienti verticali maggiori in tutte e quattro le condizioni di velocità dei ricambi d'aria per ora.

Indipendentemente dall'aumento della velocità dei ricambi d'aria/ora del sistema meccanico di ventilazione, la condizione meno vantaggiosa, quindi con valori di draught rate maggiori, si verifica sempre a un'altezza uguale a $z = 0,1$ m. Questo suggerisce una maggiore sensibilità al draught rate vicino al pavimento.

La variazione del discomfort termico tra 0,1 m e 1,1 m è di circa l'8,7% per $n = 0 \text{ h}^{-1}$, tale valore diminuisce con l'aumento della velocità del sistema di ventilazione meccanica, arrivando al 7,1% circa per $n = 5 \text{ h}^{-1}$.

Con un vetro dalle prestazioni termiche medie, i punti più vicini alla finestra e in prossimità delle bocchette di mandata e ripresa del sistema di ventilazione meccanica presentano valori di draught rate più elevati in quasi tutte le combinazioni di ricambi d'aria/ora e a quasi tutte le altezze. In particolare, in tutte le velocità del sistema di ventilazione meccanica controllata, il punto di presa 5 risulta essere sempre quello con il valore maggiore di draught rate per $z = 0,1$ m.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	1,349	0,467	0,162	0,870	0,255	0,283	1,187	0,000	0,089	0,909	0,000	0,438
2	3,938	0,000	0,043	5,030	0,048	0,177	3,874	0,000	0,090	5,653	0,000	0,000
3	4,530	6,568	3,244	0,702	0,263	0,610	3,401	4,741	5,322	4,699	0,010	0,065
4	5,296	0,000	0,000	7,159	0,000	0,000	6,431	0,033	0,057	6,219	0,121	0,093
5	11,887	0,000	0,000	10,824	0,000	0,179	8,546	0,000	0,077	8,618	0,000	0,000
6	2,053	0,016	0,553	1,121	0,788	0,574	1,223	0,057	0,276	1,151	0,537	1,439
7	3,585	0,000	0,208	0,534	0,093	0,117	3,958	0,000	0,043	0,598	0,000	0,382
8	1,208	0,059	0,000	1,721	0,092	0,000	1,580	0,410	0,046	2,644	0,000	0,099
9	2,622	0,000	0,079	1,264	0,000	0,000	3,926	0,024	0,000	0,014	0,000	0,206
10	3,613	0,000	0,020	5,361	0,000	0,103	6,586	0,000	0,000	4,810	0,000	0,011
11	0,515	0,020	0,038	0,112	0,022	0,000	1,391	0,000	0,011	4,011	0,074	0,000
12	0,000	0,000	0,073	0,701	0,241	0,370	1,117	0,052	0,058	2,886	0,074	0,109
13	0,019	0,000	0,000	0,100	0,000	0,045	0,411	0,065	0,021	1,818	0,131	0,077
Δ DR (%) max	11,887	6,568	3,244	10,724	0,788	0,610	8,136	4,741	5,322	8,604	0,537	1,439

Tabella 27– Valori medi del draught rate per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)
1	-1,187	-0,587	-1,098	-0,472
2	-3,896	-4,853	-3,784	-5,653
3	-1,286	-0,092	1,920	-4,634
4	-5,296	-7,159	-6,374	-6,126
5	-11,887	-10,646	-8,469	-8,618
6	-1,500	-0,547	-0,948	0,288
7	-3,377	-0,417	-3,914	-0,215
8	-1,208	-1,721	-1,535	-2,544
9	-2,544	-1,264	-3,926	0,192
10	-3,593	-5,258	-6,586	-4,799
11	-0,476	-0,112	-1,380	-4,011
12	0,073	-0,331	-1,059	-2,778
13	-0,019	-0,055	-0,390	-1,741

Tabella 28– Gradienti verticali del draught rate per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

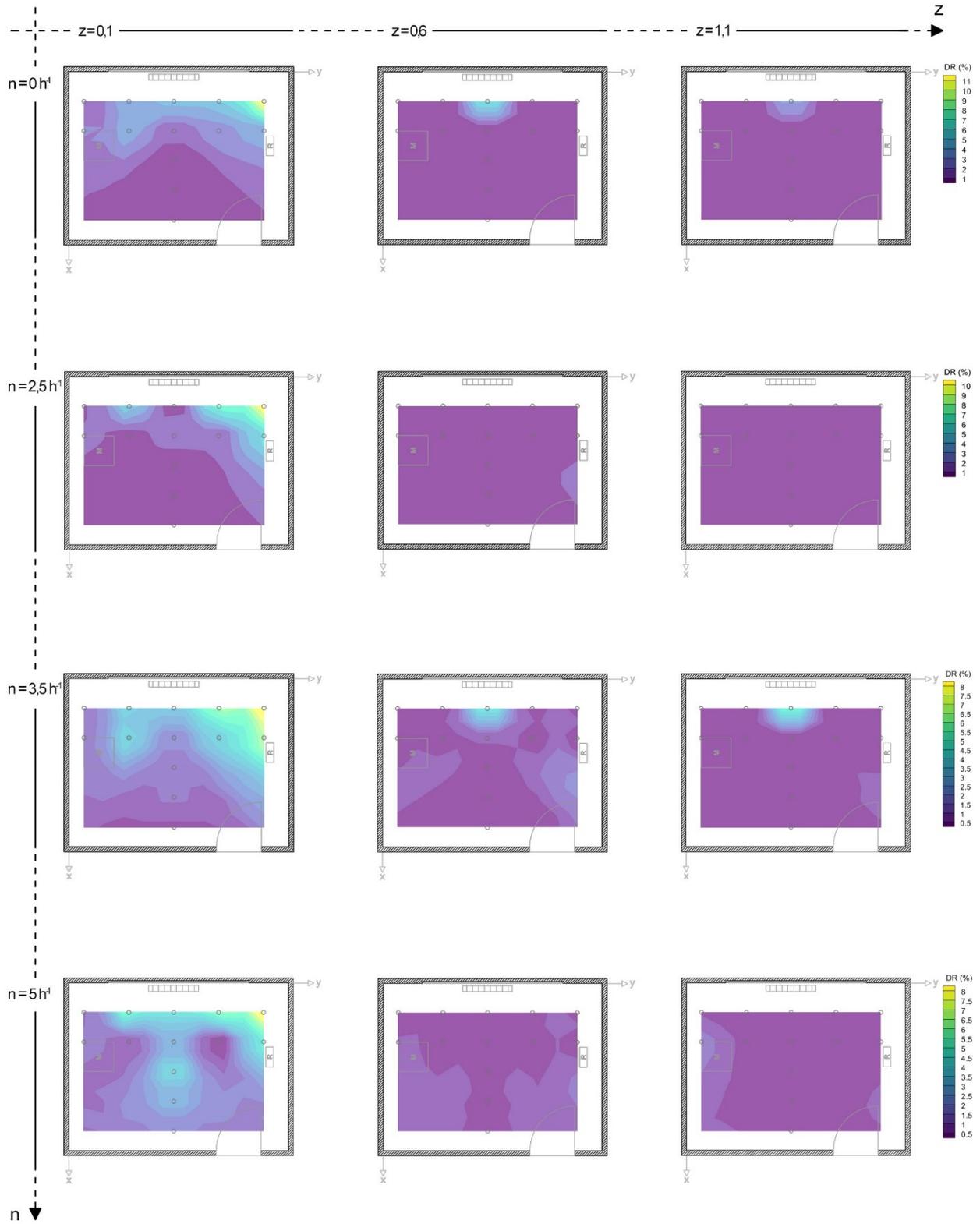


Fig.51. *Mappa del comfort del draght rate (%) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$.*

Manichino termico

La tabella (Tab. 29) riporta la media dei dati acquisiti dalle 27 zone anatomiche del manichino termico, suddivise in tre macroaree del corpo, corrispondenti ai tre punti di rilevamento della ComfortSense Dantec (0,1 m , 0,6 m , 1,1 m). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione intermedia in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un doppio vetro con intercapedine; quindi, con prestazioni termiche non particolarmente elevate. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

La tabella contiene i dati numerici rappresentati nei grafici della temperatura equivalente (Fig. 53 e 54) rilevata a tre altezze (z).

Posizionando il manichino nel punto di rilevamento 3, situato di fronte alla stufa ad una distanza di 60 cm, si osserva (Fig. 53) una situazione quasi uniforme per tutte le velocità del sistema di ventilazione meccanica, eccetto per la zona della schiena, dove possiamo notare delle variazioni tra le diverse velocità.

Quando il manichino è posizionato nel punto di rilevamento 8, a una distanza di 120 cm dalla stufa, si osserva (Fig. 54) omogeneità nei valori delle temperature in tutte e quattro le situazioni.

In entrambe le posizioni di rilevamento (punto 3 e punto 8), le temperature più elevate sono state registrate nella zona del bacino, con valori che raggiungono i 32°C nel punto 3 e 31,3°C nel punto 8, entrambe ad una velocità dei ricambi d'aria/ora a $n = 5 \text{ h}^{-1}$. Le temperature più basse sono state rilevate in corrispondenza della mano sinistra, con valori di circa 24,8°C per il punto 3 e circa 24,9°C per il punto 8, entrambi per $n = 3,5 \text{ h}^{-1}$.

Per quanto riguarda il PMV (Tab. 30), si nota una situazione omogenea per tutte e quattro le condizioni dei ricambi d'aria/ora, indicando una percezione termica neutrale, tendente al caldo moderato.

Relativamente al PPD (Tab. 30), la percentuale di insoddisfatti non varia significativamente in tutte le condizioni e per entrambi i punti di rilevamento.

	n	Parti Corpo	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
			T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8
0,1	1	L. Foot	25,76	25,80	25,58	25,70	25,62	25,60	25,73	25,60
	2	R. Foot	26,28	26,40	26,15	26,46	26,20	26,42	26,27	26,50
	3	L. Foreleg	26,04	26,00	25,96	26,00	25,90	26,00	25,98	26,00
	4	R. Foreleg	26,85	26,90	26,75	27,00	26,68	26,96	26,70	27,00
0,6	5	L. Front Thigh	27,42	27,55	27,50	27,50	27,50	27,50	27,55	27,50
	6	R. Front Thigh	27,20	27,44	27,20	27,50	27,20	27,50	27,22	27,50
	7	L. Back Thigh	29,49	29,64	29,60	29,60	29,60	29,60	29,60	29,60
	8	R. Back thigh	29,55	29,75	29,60	29,80	29,65	29,85	29,70	29,90
	9	Pelvis	31,58	32,13	31,77	32,20	31,89	32,20	32,00	32,28
	20	Backside	30,57	31,75	31,26	31,80	31,54	31,80	31,63	31,89
	25	Back L.Down	31,51	31,30	31,18	31,48	31,10	31,50	31,12	31,50
	23	Back R. Down	31,87	31,70	31,62	31,80	31,60	31,81	31,60	31,90
	13	L. Hand	25,05	24,96	24,86	24,94	24,80	24,93	24,80	24,97
	14	R. Hand	26,10	26,10	25,97	26,20	25,95	26,20	26,03	26,20
	15	L. Forearm	27,35	27,29	27,26	27,30	27,18	27,30	27,14	27,30
	16	R. Forearm	28,38	28,39	28,30	28,40	28,30	28,40	28,30	28,40
	21	Stomach L.	29,58	29,64	29,50	29,70	29,50	29,78	29,50	29,80
27	Stomach R.	30,30	30,37	30,23	30,43	30,20	30,50	30,29	30,50	
1,1	17	L. Upper arm	27,39	27,49	27,20	27,60	27,20	27,60	27,20	27,60
	18	R. Upper arm	29,10	29,09	29,09	29,11	29,00	29,11	29,04	29,16
	19	Chest L.	28,09	28,16	27,91	28,20	27,86	28,20	27,83	28,21
	26	Chest R.	28,84	28,94	28,80	29,00	28,80	29,03	28,80	29,10
	12	Back L. Up	28,94	29,04	28,80	29,10	28,80	29,10	28,80	29,14
	22	Back R. Up	29,43	29,54	29,40	29,61	29,43	29,70	29,50	29,70
	10	L. Face	25,57	25,69	25,21	25,80	25,20	25,88	25,20	25,92
	24	R. Face	26,63	26,49	26,41	26,60	26,45	26,61	26,50	26,68
	11	Skull	27,77	27,71	27,50	27,80	27,50	27,80	27,50	25,92

Tabella 29 – Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nei punti 3 ed 8, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8
PMV	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,83	0,80	0,90
PPD (%)	18,08	19,48	17,46	20,10	17,54	20,19	17,96	20,45

Tabella 30 – Valori medi PMV e PPD per i due punti di presa, 3 ed 8, al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

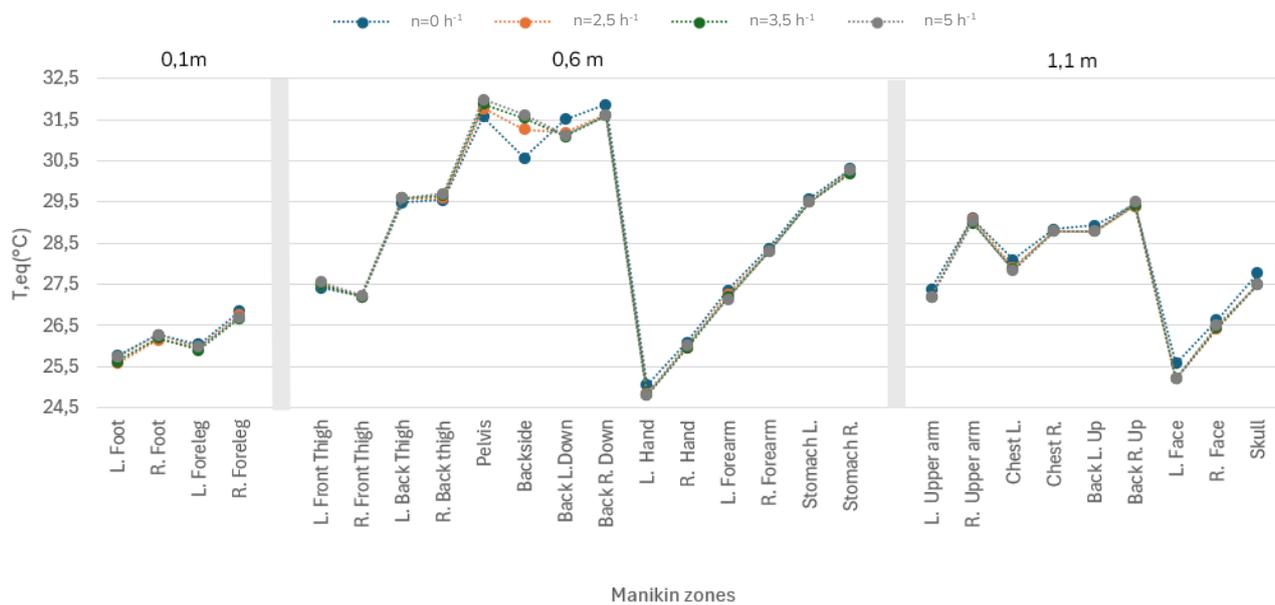


Fig.52. Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nel punto di presa 3, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

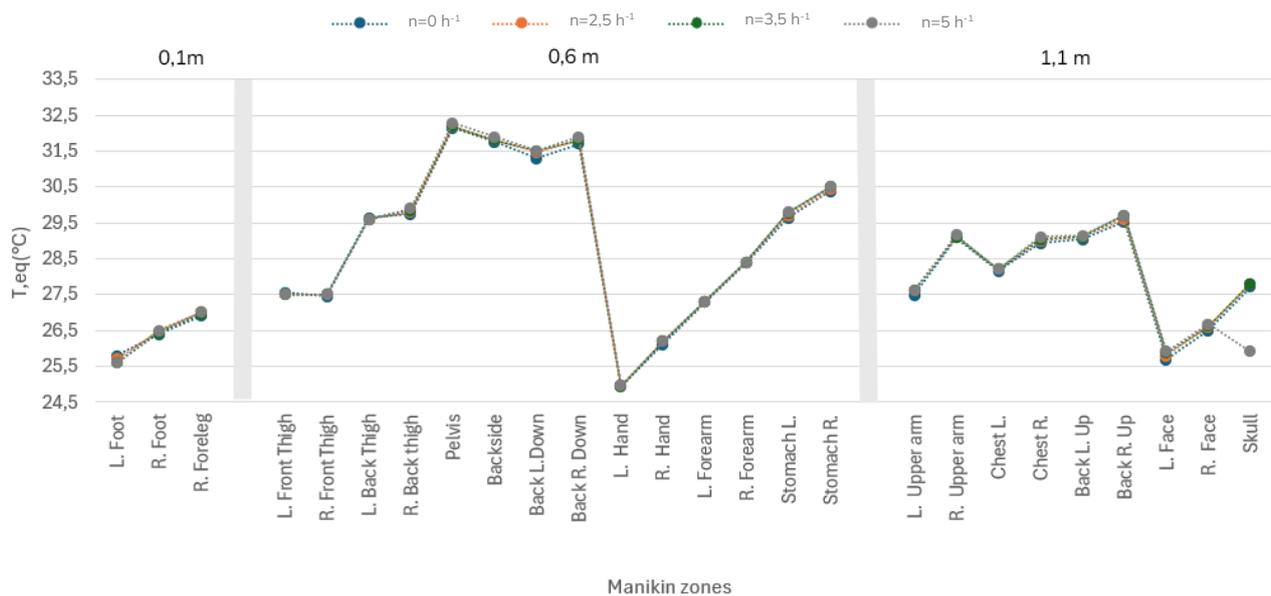


Fig.53. Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nel punto di presa 8, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Nel caso approfondito in seguito, la trasmittanza termica U_w del vetro della finestra è stata impostata a un valore pari a:

$$U_w = \frac{1 \text{ W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Il valore estremamente ridotto rappresenta un avanzamento notevole nelle capacità isolanti rispetto alle soluzioni precedenti, mettendo in luce l'ottimizzazione dell'efficienza energetica. Le prove effettuate hanno replicato le condizioni ambientali tipiche del periodo invernale, permettendo di osservare come la riduzione della trasmittanza termica delle finestre contribuisca a una marcata diminuzione della dispersione di calore e a una limitazione dell'infiltrazione di aria fredda.

Questo valore ottimale in termini di trasmittanza indica un'eccellente capacità isolante del vetro, il che garantisce che il calore generato all'interno dell'ambiente venga mantenuto efficacemente, riducendo il fabbisogno energetico per il riscaldamento. Assicura un livello costante di qualità dell'aria interna (Indoor Environmental Quality, IEQ), essenziale per il benessere degli occupanti. Nell'ambito della IEQ negli ambienti scolastici, diversi parametri sono stati attentamente analizzati per garantire un comfort ottimale.

Durante le prove sperimentali, sono stati acquisiti dati precisi riguardanti la temperatura dell'aria, la temperatura operativa, il tasso di correnti d'aria e la velocità dell'aria.

La combinazione del sistema di riscaldamento (radiatore elettrico) e della ventilazione meccanica controllata (VMC) permette di mantenere la temperatura entro un intervallo ottimale, evitando sia il surriscaldamento che il raffreddamento eccessivo.

La gestione attenta di tutti questi fattori attraverso prove sperimentali ha assicurato un contesto di apprendimento più favorevole, riducendo i disagi legati a condizioni climatiche estreme e migliorando complessivamente l'esperienza educativa.

Air temperature (°C)

Le tabelle riportate (Tab. 31 e 33) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura dell'aria (°C) (Fig.55) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione si riferisce alla condizione più favorevole in termini di trasmittanza, dove i pannelli radianti simulano un vetro triplo con intercapedine; quindi, la migliore delle prestazioni termiche raggiungibili. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

Osservando i gradienti termici verticali (Tab. 32), ovvero la differenza di temperatura misurata a 0,1 m e 1,1 m da terra nello stesso punto, si nota che queste differenze sono tutte inferiori al limite di 3°C stabilito dalla normativa UNI EN 7730. Questo indica una distribuzione verticale della temperatura conforme ai requisiti di comfort.

Possiamo notare come, indipendentemente dall' aumento della velocità dei ricambi d'aria/ora, la condizione meno vantaggiosa, quindi la più fredda, è sempre quella con altezza uguale a $z = 0,1$ m. Quella più favorevole, quindi con temperature più alte, risulta essere sempre quella a $z = 1,1$ m. Abbiamo una variazione media di temperatura tra 0,1 m e 1,1 m di circa 0,3° C. di Questo spiega il fenomeno della stratificazione delle temperature, dove l'aria calda, essendo più leggera di quella fredda, tende a salire verso il soffitto, mentre quella fredda ristagna a livello del pavimento.

In presenza di un vetro ad alte prestazioni e dunque a bassa trasmittanza, si osserva che all'aumentare della velocità del sistema di ricircolo dell'aria, la temperatura all'interno della stanza di prova rimane quasi omogenea. Non ci sono variazioni significative tra i vari punti della stanza.

I valori massimi delle temperature, evidenziati in rosso nella Tab. 30, mostrano una variazione minima: da 20,1°C a una velocità di ricambio d'aria $n = 0 \text{ h}^{-1}$ a 19,9°C a una velocità di ricambio d'aria $n = 5 \text{ h}^{-1}$. Questa differenza di 0,2°C è molto ridotta e difficilmente percepibile, indicando un'elevata uniformità della distribuzione termica grazie alle prestazioni della vetrata e del sistema di ricircolo dell'aria.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	19,80	20,05	20,04	19,56	19,86	19,85	19,68	19,91	19,91	19,61	19,74	19,97
2	19,69	20,08	20,05	19,44	19,88	19,87	19,48	19,91	19,82	19,51	19,78	19,93
3	19,53	20,11	20,05	19,49	19,89	19,84	19,51	20,07	20,05	19,75	19,81	19,82
4	19,62	20,05	20,01	19,39	19,87	19,84	19,40	19,82	19,79	19,40	19,76	19,88
5	19,54	20,05	20,02	19,43	19,94	19,93	19,32	19,82	19,80	19,37	19,80	19,91
6	19,53	19,95	19,94	19,86	20,19	20,38	19,66	19,84	20,02	19,50	19,69	19,79
7	19,52	19,98	19,97	19,51	19,95	19,96	19,86	19,99	20,07	19,40	19,77	19,82
8	19,63	20,10	20,04	19,51	19,84	19,80	19,53	20,01	20,01	19,69	19,82	19,91
9	19,63	20,01	20,04	19,74	20,08	20,22	19,46	19,71	19,77	19,44	19,74	19,90
10	19,65	20,08	20,04	19,52	19,94	19,96	19,39	19,79	19,79	19,45	19,79	19,93
11	19,64	20,10	20,08	19,56	19,82	19,85	19,56	19,98	20,03	19,71	19,84	19,98
12	19,69	20,08	20,08	19,50	19,83	19,86	19,58	19,94	20,00	19,64	19,82	19,99
13	19,79	20,08	20,14	19,58	19,84	19,90	19,66	19,94	19,99	19,64	19,77	19,96
ΔT (°C) max	0,28	0,15	0,20	0,47	0,37	0,58	0,54	0,36	0,30	0,38	0,15	0,20

Tabella 31 – Valori medi della temperatura dell'aria per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	ΔT_v (°C)	ΔT_v (°C)	ΔT_v (°C)	ΔT_v (°C)
1	0,24	0,30	0,23	0,36
2	0,37	0,43	0,34	0,42
3	0,52	0,35	0,54	0,08
4	0,39	0,45	0,39	0,47
5	0,48	0,50	0,48	0,54
6	0,40	0,52	0,36	0,29
7	0,45	0,45	0,20	0,42
8	0,41	0,29	0,48	0,21
9	0,41	0,48	0,30	0,46
10	0,39	0,43	0,40	0,48
11	0,44	0,29	0,47	0,27
12	0,39	0,36	0,42	0,35
13	0,35	0,32	0,33	0,32

Tabella 32 – Gradienti verticali della temperatura dell'aria per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

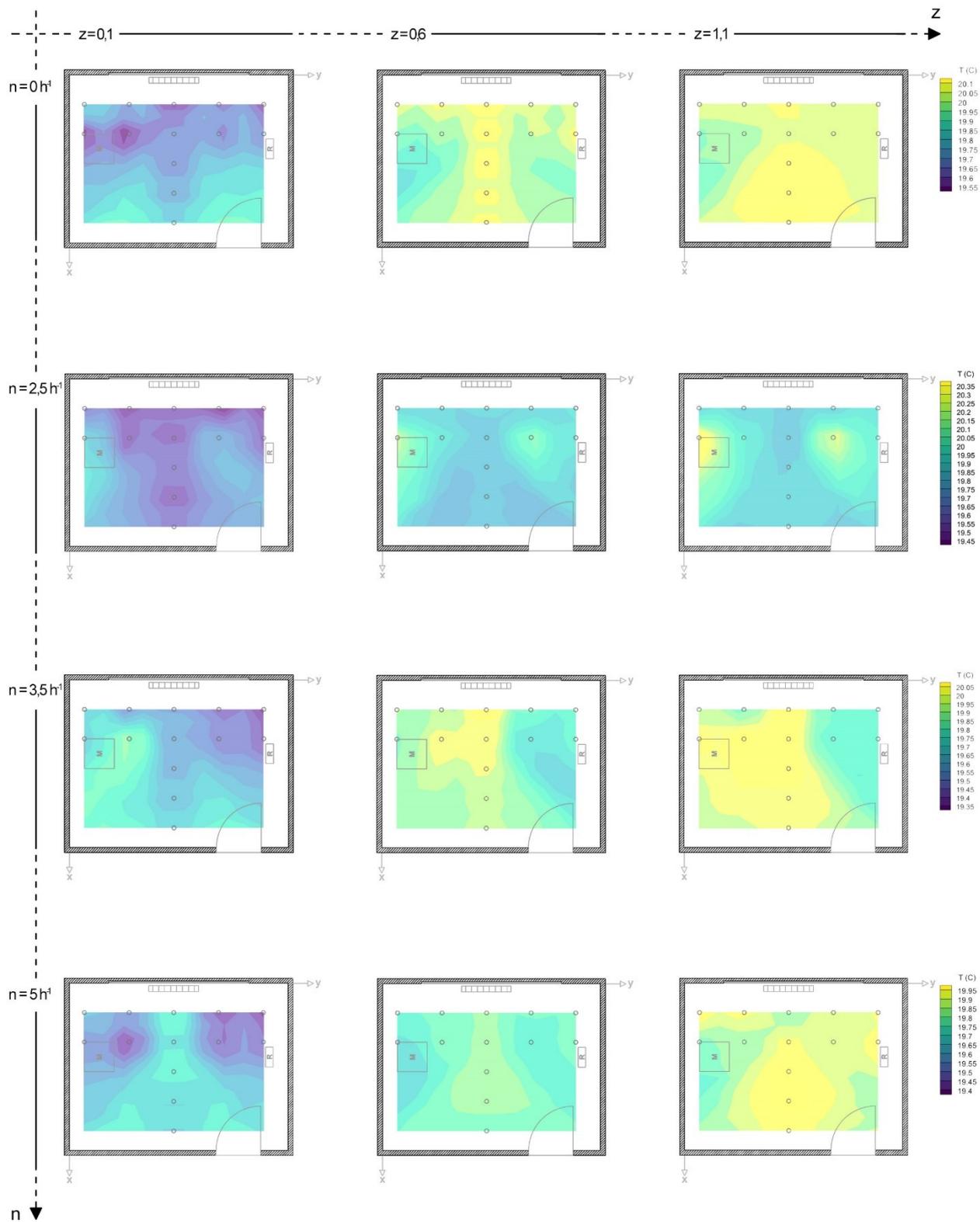


Fig.54. *Mappa del confort della temperatura dell'aria (°C) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1W/m^2K$.*

Operative temperature (°C)

La temperatura operativa (°C) è stata misurata esclusivamente ad un'altezza di 0,6 m dal suolo, sfruttando la posizione del sensore globo inclinato a 45°.

La tabella successiva (Tab. 33) riporta i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura operativa (°C) (Fig. 56) ad un'altezza fissa di 0,6 m e con quattro diversi tassi di ricambio d'aria per ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione riguarda la condizione ottimale in termini di trasmittanza, con pannelli radianti che simulano un vetro ad altissima prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

In presenza di un vetro con elevate prestazioni termiche, si osserva che, con il sistema di ventilazione spento, le temperature all'interno della camera di prova risultano più alte. Al crescere della velocità dei ricambi d'aria per ora, le temperature tendono a diminuire, sia le massime (segnalate in rosso) sia le minime (segnalate in blu) (Tab. 33). Non ci sono differenze significative nelle variazioni di temperatura tra le diverse velocità di ricambio d'aria, il che è giustificato dall'efficiente prestazione termica del vetro.

L'alta prestazione termica del vetro contribuisce a mantenere temperature più elevate all'interno della camera di prova quando il sistema di ventilazione è spento o a bassa velocità. Invece, l'aumentare della velocità dei ricambi d'aria, porta a una diminuzione delle temperature, ma le variazioni non sono significative grazie all'efficienza del vetro.

Indipendentemente dall'aumento della velocità del sistema di ventilazione meccanica, il punto di rilevazione 4 rimane il più freddo in tutti i casi.

	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
		0,6		0,6		0,6		0,6
1		20,01		19,81		19,86		19,76
2		19,90		19,76		19,73		19,70
3		19,95		19,69		19,90		19,75
4		19,83		19,69		19,60		19,58
5		19,91		19,79		19,63		19,64
6		19,89		20,18		19,84		19,71
7		19,89		19,83		19,88		19,66
8		19,98		19,70		19,92		19,73
9		19,87		20,00		19,67		19,64
10		19,97		19,87		19,66		19,69
11		20,04		19,76		19,94		19,76
12		20,10		19,86		19,97		19,83
13		20,09		19,87		19,94		19,80
ΔT (°C) max		0,27		0,49		0,36		0,24

Tabella 33 – Valori medi della temperatura operativa per i 13 punti di presa a 0,6 m di altezza al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

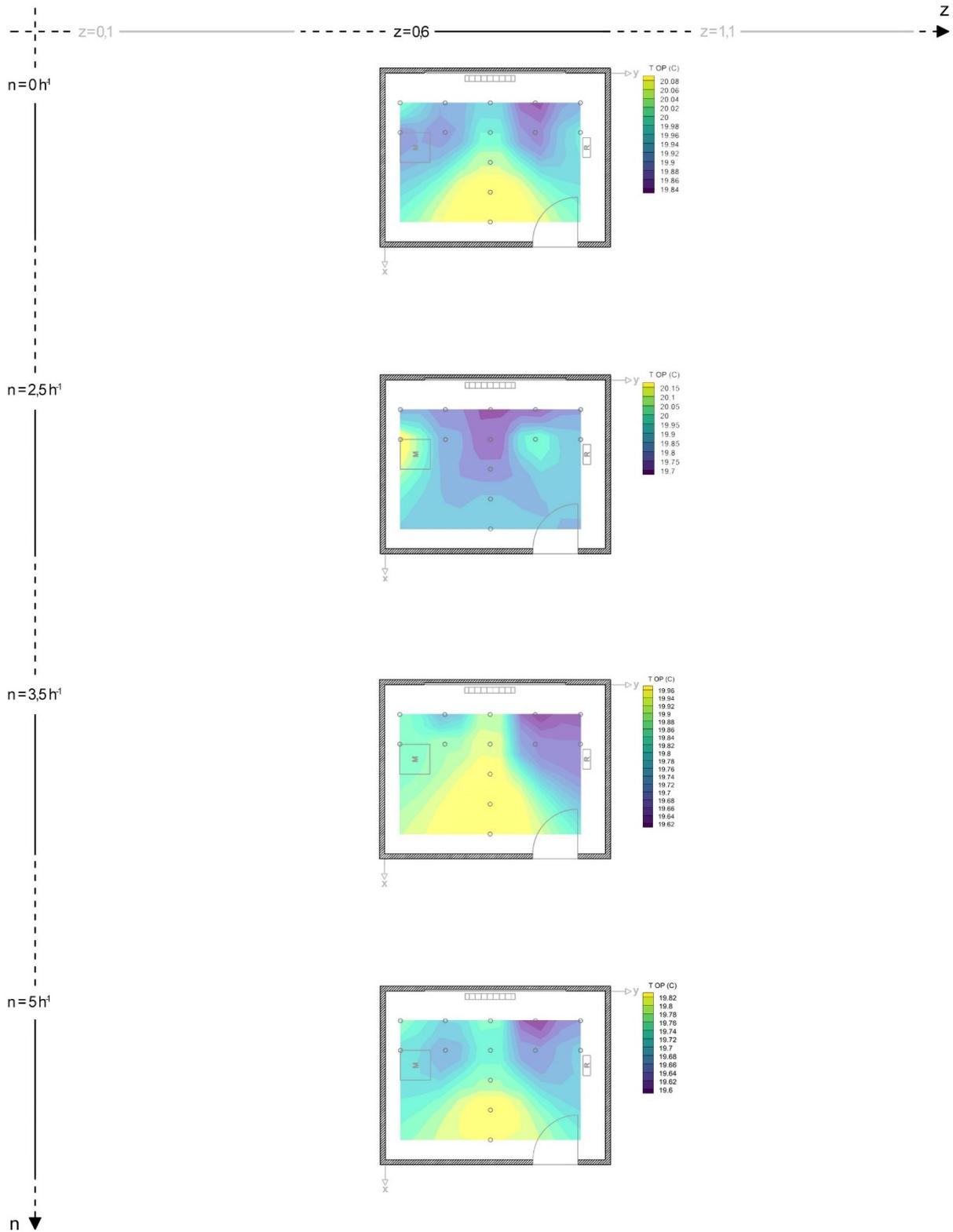


Fig.55. Mappa del comfort della temperatura operativa (°C) a 0,6 m di altezza al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Air Velocity (m/s)

Le tabelle riportate (Tab. 34 e 35) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura della temperatura operativa (m/s) (Fig. 57) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione riguarda la condizione ottimale in termini di trasmittanza, con pannelli radianti che mimano un vetro ad altissima prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

È evidente che, indipendentemente dall'aumento della velocità dei ricambi d'aria per ora, il flusso d'aria a velocità maggiori si rileva quasi a un'altezza di 0,1 m, tranne nel caso di $n = 5 \text{ h}^{-1}$ ad altezza 1,1 m (Tab. 34). Al contrario, le velocità più basse si registrano costantemente a un'altezza di 0,6 m.

Alla quota di 0,1 m, la velocità dell'aria risulta generalmente più alta rispetto alle altre altezze. Questo perchè l'aria calda tende a salire, creando un flusso più turbolento vicino al pavimento, dove il riscaldatore elettrico potrebbe influenzare maggiormente la velocità dell'aria.

In presenza di un vetro ad alta prestazione termica, che minimizza la trasmittanza termica, si osserva che l'incremento della velocità del sistema di ricircolo dell'aria non influisce significativamente sulla distribuzione della velocità dell'aria all'interno della stanza di prova. Questo indica che, nonostante le variazioni di velocità in differenti punti di presa nella stanza, le differenze tra le altezze rimangono generalmente trascurabili, suggerendo una distribuzione omogenea dell'aria nelle condizioni studiate.

Si osserva una variazione di velocità massima dell'aria tra 0,1 m e 0,6 m di circa 0,035 m/s con $n = 0 \text{ h}^{-1}$, una differenza che diminuisce con l'aumentare della velocità del sistema di ventilazione meccanica, fino ad arrivare a circa 0,025 m/s con $n = 5 \text{ h}^{-1}$.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	0,041	0,029	0,033	0,031	0,027	0,027	0,031	0,031	0,033	0,033	0,027	0,039
2	0,038	0,025	0,025	0,046	0,027	0,024	0,045	0,025	0,034	0,036	0,025	0,026
3	0,049	0,025	0,031	0,052	0,024	0,027	0,063	0,027	0,029	0,031	0,028	0,033
4	0,036	0,024	0,028	0,042	0,024	0,025	0,044	0,020	0,024	0,040	0,022	0,023
5	0,062	0,027	0,030	0,052	0,025	0,024	0,059	0,027	0,025	0,041	0,025	0,023
6	0,045	0,025	0,026	0,028	0,023	0,030	0,033	0,025	0,032	0,030	0,027	0,065
7	0,045	0,024	0,038	0,039	0,021	0,025	0,029	0,026	0,037	0,039	0,024	0,027
8	0,034	0,023	0,027	0,042	0,020	0,026	0,048	0,022	0,024	0,039	0,025	0,024
9	0,033	0,021	0,024	0,036	0,024	0,024	0,034	0,023	0,023	0,034	0,023	0,023
10	0,037	0,026	0,028	0,040	0,028	0,026	0,043	0,026	0,026	0,033	0,020	0,022
11	0,031	0,023	0,029	0,037	0,019	0,024	0,040	0,021	0,023	0,035	0,025	0,024
12	0,035	0,024	0,026	0,036	0,025	0,026	0,037	0,023	0,025	0,027	0,027	0,024
13	0,031	0,023	0,023	0,032	0,026	0,020	0,034	0,026	0,020	0,028	0,030	0,026
ΔV (m/s) max	0,032	0,008	0,015	0,025	0,009	0,010	0,033	0,011	0,016	0,014	0,010	0,043

Tabella 34 – Valori medi della velocità dell'aria per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	ΔV_v (m/s)	ΔV_v (m/s)	ΔV_v (m/s)	ΔV_v (m/s)
1	-0,007	-0,004	0,001	0,006
2	-0,013	-0,021	-0,012	-0,010
3	-0,018	-0,025	-0,033	0,003
4	-0,009	-0,018	-0,020	-0,018
5	-0,032	-0,028	-0,033	-0,018
6	-0,018	0,003	-0,001	0,035
7	-0,007	-0,013	0,007	-0,012
8	-0,007	-0,016	-0,024	-0,015
9	-0,009	-0,011	-0,012	-0,011
10	-0,009	-0,013	-0,018	-0,011
11	-0,002	-0,013	-0,017	-0,011
12	-0,009	-0,010	-0,012	-0,002
13	-0,008	-0,013	-0,014	-0,001

Tabella 35 – Gradienti verticali della velocità dell'aria per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

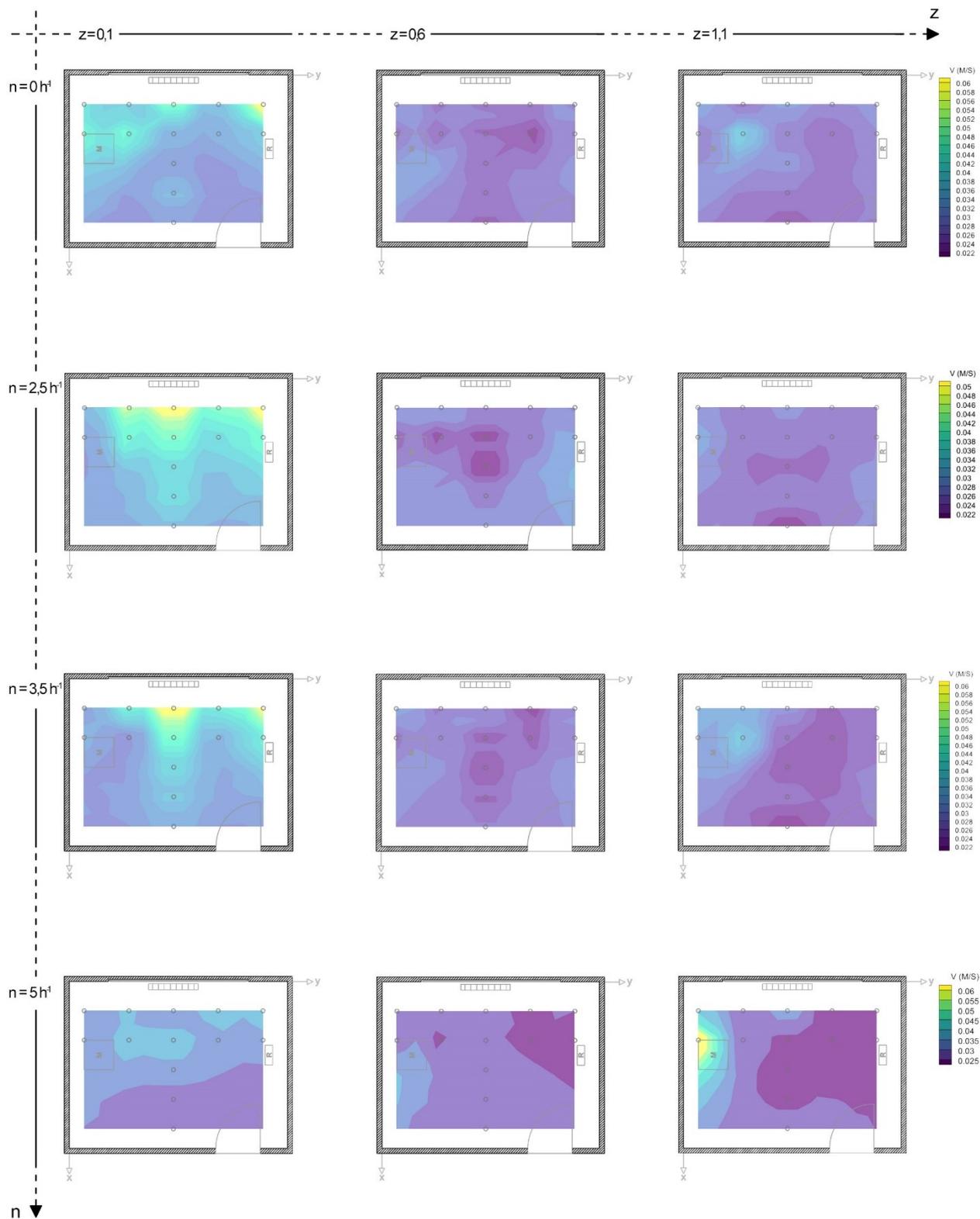


Fig.56. *Mappa del comfort della velocità (m/s) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$.*

Draught Rate (%)

Le tabelle riportate (Tab. 36 e 37) contengono i dati numerici rappresentati graficamente nella mappatura del draught rate (%) (Fig. 58) a tre altezze (z) e a quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). Fare riferimento alla Fig. 14 per i punti di presa.

Il caso in questione riguarda la condizione ottimale in termini di trasmittanza, con pannelli radianti che mimano un vetro ad altissima prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

Esaminando i gradienti verticali (Tab. 37) del draught rate, ossia la differenza delle correnti d'aria rilevate a 0,1 m e 1,1 m dal suolo nello stesso punto, emerge che tutti i valori sono inferiori al limite del 15% stabilito dalla normativa UNI EN 7730. Questo risultato è indicativo di un elevato comfort ambientale.

Indipendentemente dall'incremento dei tassi di ricambio d'aria del sistema di ventilazione meccanica, la condizione meno favorevole, ovvero con valori di draught rate più elevati, si manifesta sempre a un'altezza di $z = 0,1$ m, ad eccezione del caso in cui $n = 5 \text{ h}^{-1}$, dove il valore più elevato si rileva a $z = 1,1$ m.

La variazione del discomfort termico tra 0,1 m e 1,1 m è di circa il 2% per $n = 0 \text{ h}^{-1}$.

In presenza di un vetro ad alta prestazione termica, che minimizza la trasmittanza termica, si osserva che l'incremento della velocità del sistema di ricircolo dell'aria non influisce significativamente sulla distribuzione del draught rate all'interno della stanza di prova. Questo suggerisce che, nonostante le variazioni nella velocità del sistema meccanico, la distribuzione del draught rate rimane pressoché invariata, evidenziando l'efficacia del vetro ad alte prestazioni nel mantenere un comfort termico stabile.

	n = 0 h ⁻¹			n = 2,5 h ⁻¹			n = 3,5 h ⁻¹			n = 5 h ⁻¹		
	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1
1	0,746	0,580	0,821	0,127	0,056	0,277	0,547	0,965	0,802	0,163	0,258	0,769
2	0,444	0,098	0,173	1,706	0,435	0,219	1,608	0,107	0,672	0,380	0,029	0,400
3	1,853	0,000	0,500	2,087	0,062	0,049	3,259	0,203	0,396	0,343	0,072	0,804
4	0,685	0,000	0,216	0,955	0,061	0,063	1,665	0,000	0,000	0,808	0,000	0,000
5	3,432	0,078	0,420	1,787	0,000	0,032	2,675	0,089	0,022	0,779	0,000	0,000
6	1,003	0,108	0,259	0,000	0,000	0,223	0,389	0,351	0,796	0,408	0,245	3,835
7	0,934	0,104	1,393	0,666	0,000	0,173	0,016	0,000	0,798	0,410	0,000	0,246
8	0,468	0,000	0,243	0,880	0,000	0,123	1,261	0,000	0,081	0,580	0,045	0,195
9	0,499	0,038	0,000	0,414	0,108	0,099	0,289	0,000	0,000	0,371	0,106	0,073
10	0,253	0,133	0,021	0,554	0,328	0,403	0,909	0,072	0,174	0,051	0,000	0,000
11	0,168	0,000	0,379	0,295	0,000	0,139	0,448	0,000	0,000	0,207	0,000	0,000
12	0,354	0,155	0,057	0,285	0,038	0,044	0,225	0,000	0,000	0,102	0,081	0,032
13	0,092	0,094	0,127	0,170	0,173	0,000	0,206	0,000	0,036	0,029	0,000	0,171
Δ DR (%) max	3,340	0,580	1,393	2,087	0,435	0,403	3,243	0,965	0,802	0,779	0,258	3,835

Tabella 36– Valori medi del draught rate per i 13 punti di presa e per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

	n = 0 h ⁻¹	n = 2,5 h ⁻¹	n = 3,5 h ⁻¹	n = 5 h ⁻¹
	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)	Δ DRv (%)
1	0,074	0,150	0,255	0,607
2	-0,272	-1,487	-0,937	0,020
3	-1,353	-2,038	-2,863	0,461
4	-0,469	-0,892	-1,665	-0,808
5	-3,013	-1,755	-2,653	-0,779
6	-0,745	0,223	0,406	3,427
7	0,460	-0,493	0,783	-0,164
8	-0,226	-0,757	-1,179	-0,385
9	-0,499	-0,316	-0,289	-0,299
10	-0,232	-0,151	-0,735	-0,051
11	0,212	-0,156	-0,448	-0,207
12	-0,297	-0,241	-0,225	-0,070
13	0,035	-0,170	-0,171	0,142

Tabella 37– Gradienti verticali del draught rate per i 13 punti di presa al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

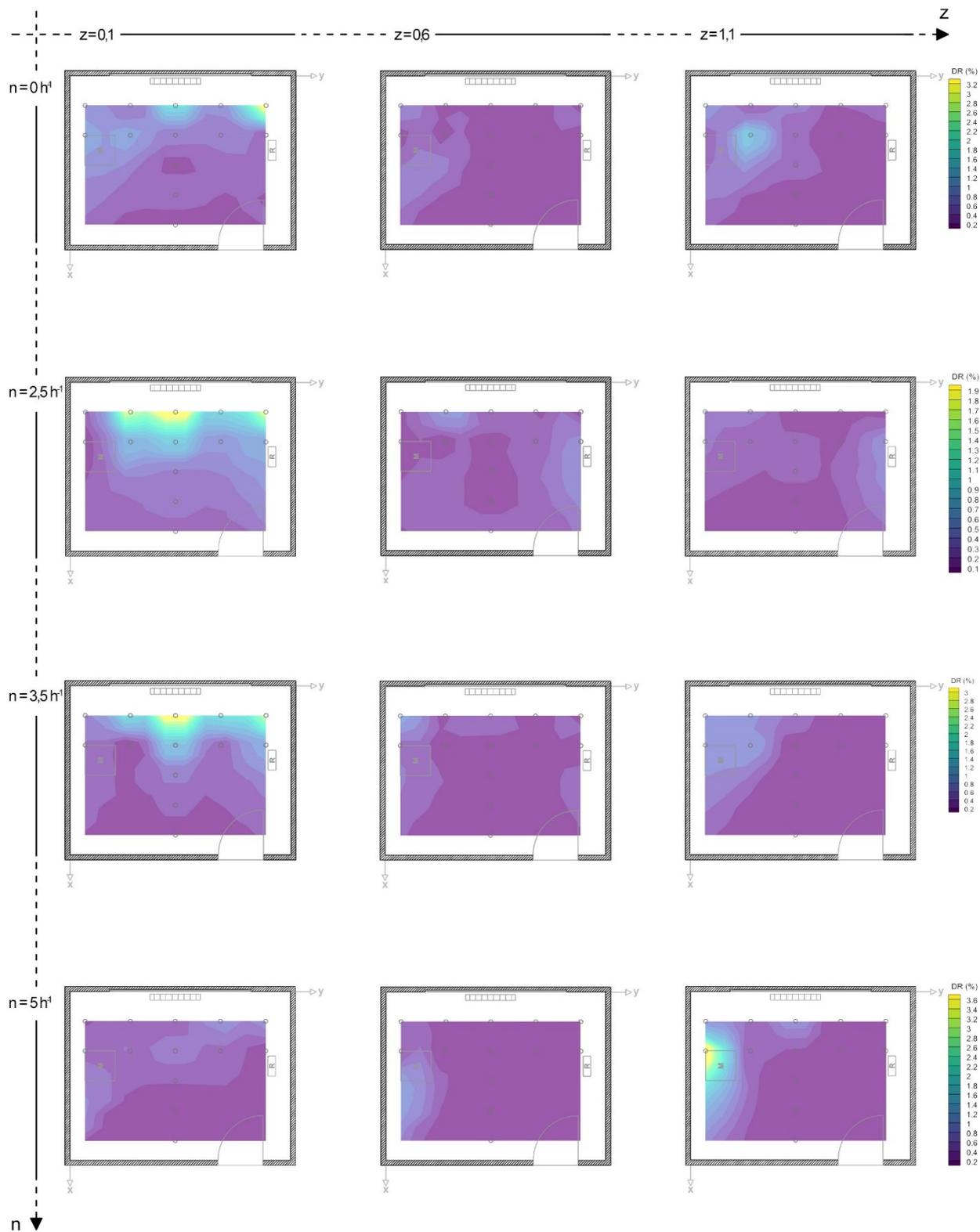


Fig.57. *Mapa del comfort del draght rate (%) per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 W/m^2K$.*

Manichino termico

La tabella (Tab. 38) riporta la media dei dati acquisiti dalle 27 zone anatomiche del manichino termico, suddivise in tre macroaree del corpo, corrispondenti ai tre punti di rilevamento della ComfortSense Dantec (0,1 m, 0,6 m, 1,1 m).

Il caso in questione riguarda la condizione ottimale in termini di trasmittanza, con pannelli radianti che mimano un vetro ad altissima prestazione termica. La camera di prova è riscaldata da un radiatore elettrico.

La tabella contiene i dati numerici rappresentati nei grafici della temperatura equivalente (Fig. 59 e 60) rilevata a tre altezze (z).

Posizionando il manichino nel punto di rilevamento 3, situato di fronte alla stufa ad una distanza di 60 cm, si osserva (Fig. 59) che la distribuzione della temperatura è omogenea attraverso tutte le velocità del sistema di ventilazione meccanica.

Analogamente, nel punto di presa 8 (Fig. 60), a una distanza di 120 cm dalla stufa, la temperatura risulta uniforme in tutte e quattro le condizioni di ventilazione testate.

In entrambe le posizioni, i valori più elevati di temperatura sono stati registrati nella zona del bacino, con punte di 32,8°C e 32,9°C rispettivamente nei punti 3 e 8, misurati a una velocità di ricambi d'aria di $n = 5 \text{ h}^{-1}$. Le temperature più basse, invece, sono state rilevate nella mano sinistra, con valori di circa 25,9°C al punto 3 e 25,7°C al punto 8, entrambe registrate con il sistema di ventilazione spento ($n = 0 \text{ h}^{-1}$). È importante notare che, in generale, i valori di temperatura rimangono altamente omogenei per tutti i 27 punti di acquisizione e per tutte e quattro le velocità del sistema di ventilazione, con variazioni massime limitate a 0,2°C.

Per quanto riguarda il PMV (Tab. 39), i dati indicano una percezione uniforme di caldo moderato attraverso tutte le condizioni di ventilazione.

L'analisi del PPD (tab. 39) rivela che la percentuale di insoddisfatti è più bassa quando il sistema di ventilazione è spento, con circa il 31,2% al punto 3 e il 30,3% al punto 8 fig n X. Con l'aumento della velocità del sistema di ventilazione meccanica, la percentuale di insoddisfatti mostra un incremento modesto, raggiungendo il 31,9% al punto 3 e il 31,6% al punto 8 con $n = 5 \text{ h}^{-1}$.

	n	Parti Corpo	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
			T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8
0,1	1	L. Foot	26,58	26,70	26,65	26,78	26,74	26,80	26,86	26,80
	2	R. Foot	27,13	27,41	27,18	27,50	27,20	27,50	27,32	27,50
	3	L. Foreleg	27,07	26,91	27,06	26,95	27,10	27,00	27,11	27,00
	4	R. Foreleg	27,75	27,80	27,70	27,86	27,70	27,90	27,78	27,90
0,6	5	L. Front Thigh	28,52	28,20	28,65	28,25	28,70	28,30	28,70	28,30
	6	R. Front Thigh	28,37	28,10	28,40	28,14	28,40	28,20	28,40	28,20
	7	L. Back Thigh	30,15	30,10	30,13	30,10	30,20	30,13	30,20	30,20
	8	R. Back thigh	30,37	30,23	30,40	30,30	30,40	30,30	30,40	30,30
	9	Pelvis	32,82	32,80	32,80	32,80	32,80	32,81	32,80	32,90
	20	Backside	32,30	32,20	32,40	32,28	32,40	32,30	32,40	32,30
	25	Back L.Down	32,19	32,01	32,30	32,10	32,30	32,10	32,35	32,10
	23	Back R. Down	32,41	32,30	32,50	32,30	32,50	32,40	32,51	32,40
	13	L. Hand	25,90	25,69	25,96	25,70	26,00	25,78	25,95	25,84
	14	R. Hand	26,89	26,85	26,90	26,90	26,90	26,95	26,90	26,93
	15	L. Forearm	28,18	28,01	28,20	28,09	28,30	28,10	28,30	28,10
	16	R. Forearm	29,00	28,90	29,00	28,90	29,00	28,98	29,00	29,00
	21	Stomach L.	30,32	30,15	30,30	30,37	30,30	30,40	30,30	30,40
27	Stomach R.	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,07	
1,1	17	L. Upper arm	28,40	28,40	28,40	28,40	28,40	28,43	28,40	28,50
	18	R. Upper arm	29,60	29,60	29,60	29,60	29,60	29,60	29,60	29,68
	19	Chest L.	28,93	28,97	28,90	29,00	28,90	29,00	28,90	29,00
	26	Chest R.	29,60	29,60	29,52	29,60	29,50	29,60	29,54	29,60
	12	Back L. Up	29,70	29,70	29,70	29,70	29,70	29,70	29,70	29,76
	22	Back R. Up	30,20	30,15	30,20	30,20	30,20	30,20	30,12	30,20
	10	L. Face	26,75	26,90	26,70	26,90	26,70	26,96	26,70	26,97
	24	R. Face	27,50	27,50	27,40	27,50	27,40	27,50	27,40	27,50
	11	Skull	28,50	28,54	28,43	28,51	28,48	28,57	28,45	26,97

Tabella 38 – Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nei punti 3 ed 8, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

	n = 0 h ⁻¹		n = 2,5 h ⁻¹		n = 3,5 h ⁻¹		n = 5 h ⁻¹	
	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8	T,eq 3	T,eq 8
PMV	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
PPD (%)	31,20	30,30	31,30	30,80	31,57	31,23	31,92	31,66

Tabella 39 – Valori medi PMV e PPD per i due punti di presa, 3 ed 8, al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

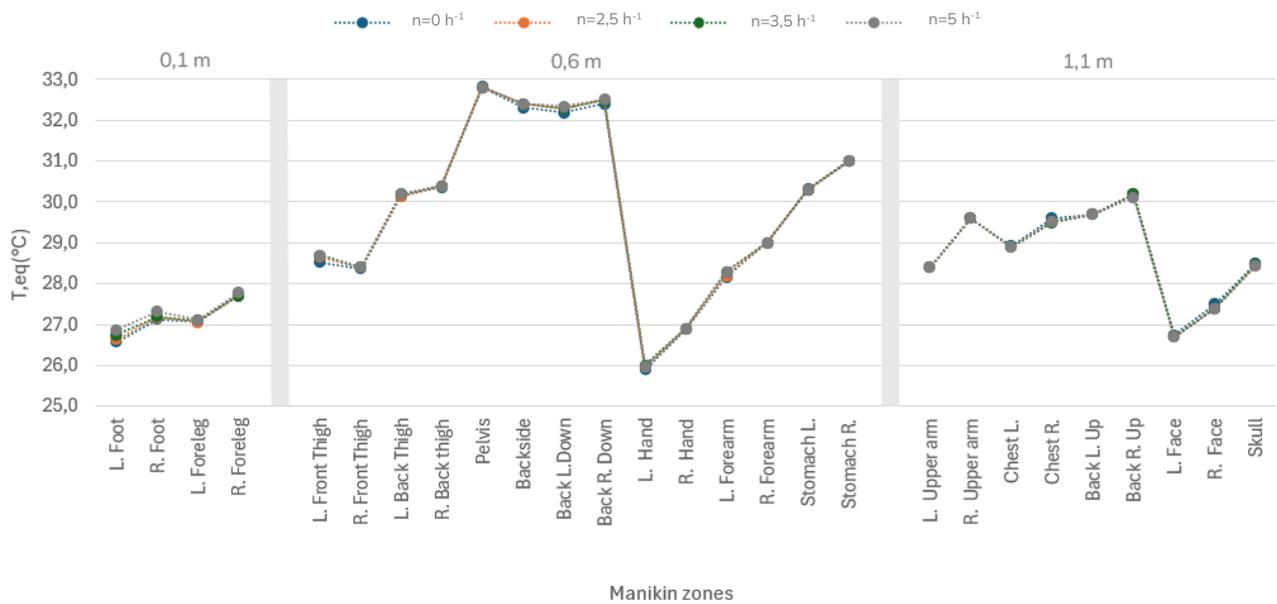


Fig.58. Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nel punto di presa 3, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata. Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

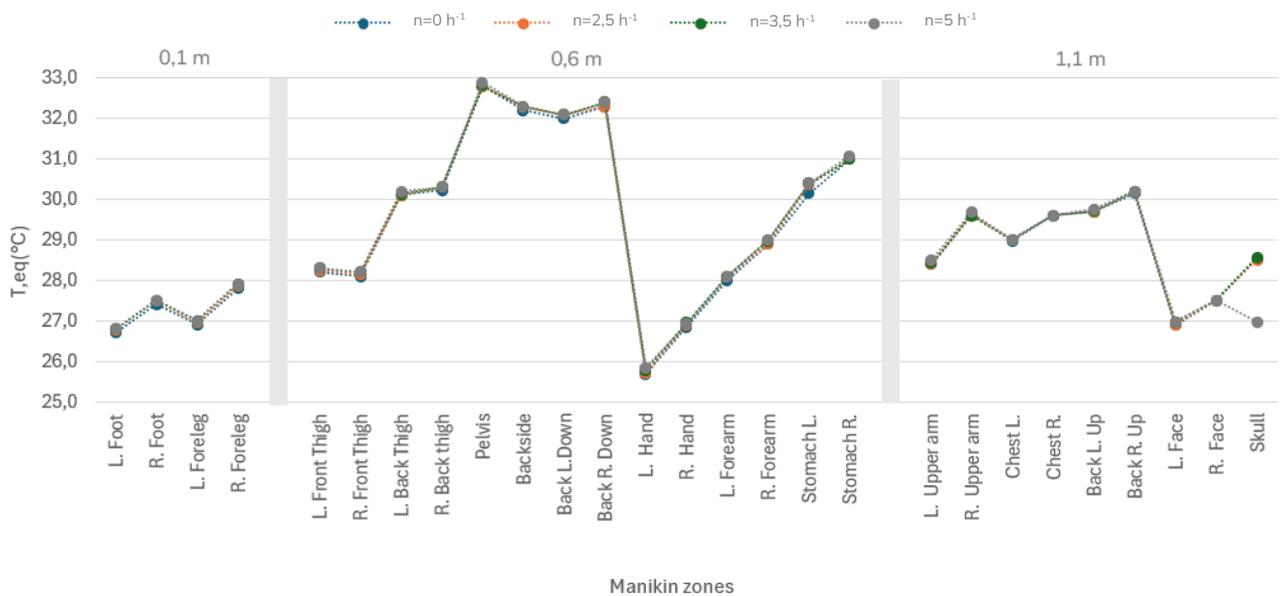


Fig.59. Valori medi della temperatura equivalente acquisiti dal manichino termico nel punto di presa 8, per le 27 parti del corpo, per le tre altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

5. DISCUSSIONI

I risultati ottenuti dai monitoraggi effettuati all'interno della camera climatica, come illustrato nel capitolo precedente, richiedono ulteriori approfondimenti e discussioni per comprenderne appieno le potenzialità e identificare gli aspetti ancora irrisolti. È essenziale analizzare in dettaglio i dati raccolti, confrontandoli con la letteratura scientifica più recente. Questo approccio permetterà di evidenziare le aree di successo e le criticità, consentendo di formulare proposte concrete per migliorare ulteriormente le condizioni di comfort ambientale. Inoltre, una discussione approfondita aiuterà a individuare eventuali lacune nel progetto e a delineare possibili direzioni per future ricerche e interventi.

5.1 Temperature (°C)

5.1.1 Air temperature

I grafici riportati di seguito mostrano i valori medi totali della temperatura dell'aria (°C) all'interno della camera climatica a tre diverse trasmittanze del vetro. Per ciascuna trasmittanza sono presenti tre diverse altezze (0,1 m, 0,6 m, 1,1m) e quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). L'analisi di questi grafici ci offre un quadro dettagliato delle variazioni termiche all'interno dell'ambiente analizzato, permettendo una valutazione approfondita dell'influenza di variabili ambientali e costruttive sul comfort termico.

Dall'analisi di questi grafici (Fig. 61, 62, 63), emerge chiaramente che, indipendentemente dalla trasmittanza del vetro, la condizione meno vantaggiosa, ovvero la più fredda, si manifesta costantemente a un'altezza di $z = 0,1$ m. Contrariamente, la condizione termica più favorevole, con temperature più elevate, si riscontra sempre a $z = 1,1$ m. Questo comportamento termico è indicativo della stratificazione delle temperature, in cui l'aria calda, essendo meno densa, tende a salire verso il soffitto, mentre l'aria fredda si accumula a livello del pavimento.

Quando si utilizzano vetri ad alte prestazioni, caratterizzati da bassa trasmittanza ($U_w = 1\text{ W} / \text{m}^2\text{K}$) (Fig. 63), si osserva che l'aumento della velocità del sistema di ricircolo dell'aria comporta una maggiore omogeneizzazione della temperatura all'interno della stanza. Quindi, le variazioni di temperatura tra le diverse altezze si riducono notevolmente, garantendo un ambiente termicamente più confortevole e uniforme. Diversamente, con l'impiego di vetri a basse prestazioni ($U_w = 5\text{ W} / \text{m}^2\text{K}$) (Fig. 61), le differenze di temperatura tra le diverse altezze sono notevolmente più marcate, e tali variazioni tendono ad aumentare con l'incremento della velocità del sistema meccanico di ventilazione. Questo suggerisce che, in queste condizioni, il comfort termico è meno uniforme e più suscettibile alle differenze di altitudine all'interno della stanza. La

maggior trasmittanza termica dei vetri comporta un intensificato scambio di calore con l'esterno, complicando il mantenimento di una temperatura costante e contribuendo a una percezione di dis-comfort per gli occupanti, in particolare nelle aree adiacenti alle finestre.

Un'ulteriore osservazione riguarda i punti situati di fronte al termosifone elettrico (posizioni 3 e 8). Questi punti tendono a mantenere temperature più alte per tutte le trasmittanze del vetro e per tutte le diverse velocità del sistema di ventilazione meccanico. Al contrario, i punti immediatamente adiacenti (posizioni 2 e 4, 7 e 9) risultano più freddi, essendo influenzati maggiormente dalla trasmittanza del vetro della finestra, che consente un maggiore ingresso di aria fredda dall'esterno, soprattutto per vetri ad alte trasmittanze.

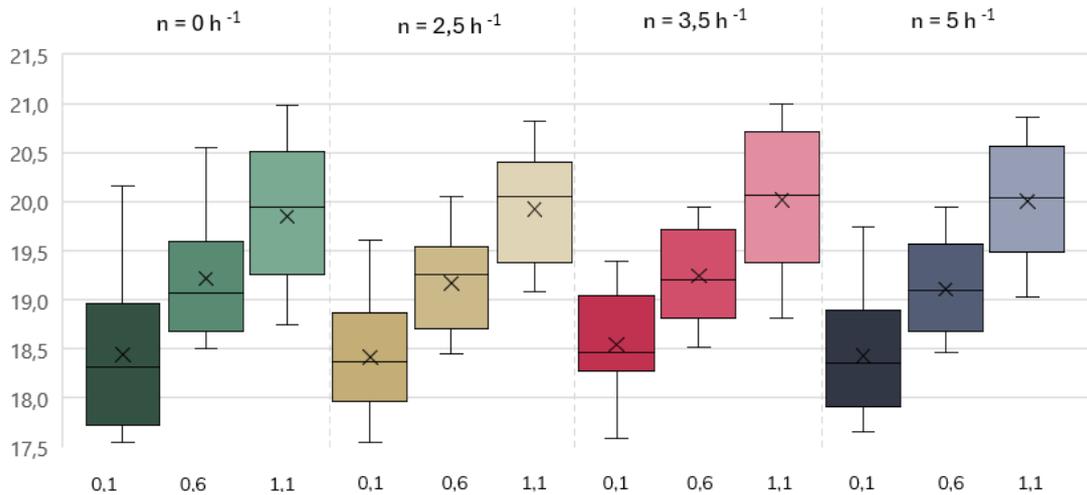


Fig.60. Valori medi totali della temperatura dell'aria per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

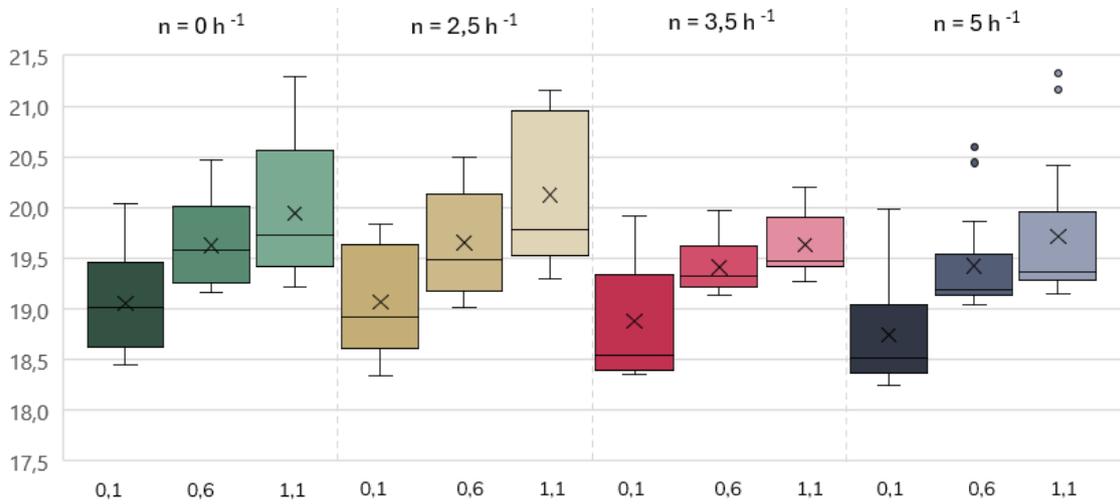


Fig.61. Valori medi totali della temperatura dell'aria per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

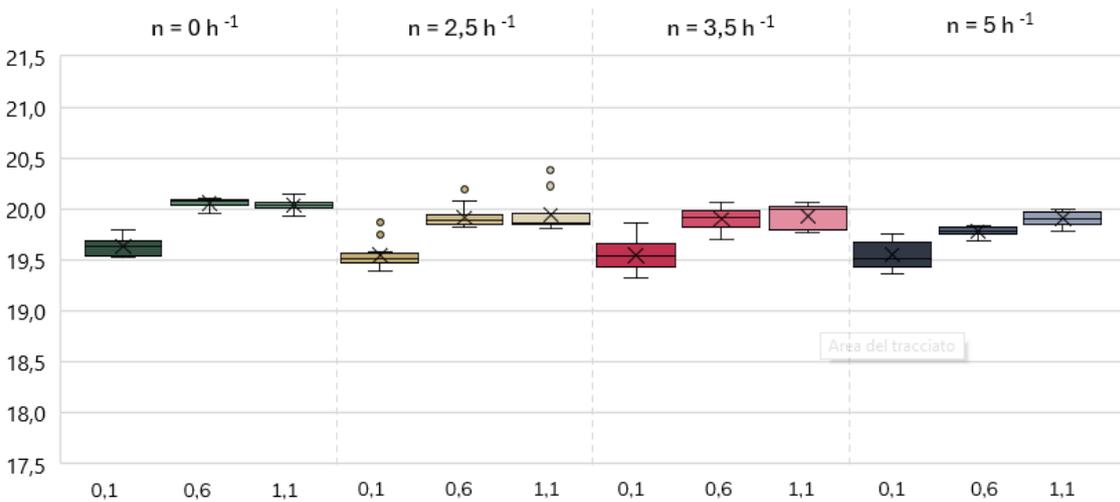


Fig.62. Valori medi totali della temperatura dell'aria per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

5.1.2 Operative temperature

I grafici riportati di seguito (Fig. 64, 65, 66) mostrano i valori medi totali della temperatura operativa (°C) all'interno della camera climatica a tre diverse trasmittanze del vetro. Per ciascuna trasmittanza è presente una sola altezza da terra fissata a 0,6 m e quattro diversi ricambi d'aria/ora (n). L'analisi di questi grafici ci offre un quadro dettagliato delle variazioni termiche all'interno dell'ambiente analizzato, permettendo una valutazione approfondita dell'influenza di variabili ambientali e costruttive sul comfort termico.

La temperatura operativa all'interno di un ambiente è influenzata da vari fattori, tra cui la trasmittanza del vetro, il tasso di ricambi d'aria, le condizioni climatiche esterne, l'orientamento dell'edificio, e le fonti di calore interne.

Dall'analisi dei grafici si osserva che, con una trasmittanza alta ($U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$) (Fig. 64), la temperatura operativa interna subisce le maggiori variazioni. Questo fenomeno si spiega con il fatto che un vetro con alta trasmittanza lascia passare più calore, sia in ingresso che in uscita, rendendo la temperatura interna altamente suscettibile alle variazioni delle condizioni esterne. Di conseguenza, si nota come il comfort termico all'interno dell'ambiente sia meno stabile e più influenzato da fattori esterni.

Al contrario, con trasmittanze inferiori, corrispondenti a vetri con migliori prestazioni termiche, le variazioni della temperatura operativa diminuiscono sensibilmente. Questo è dovuto al fatto che vetri a bassa trasmittanza limitano il passaggio di calore, contribuendo a mantenere una temperatura interna più stabile e confortevole. In tal modo, le condizioni termiche all'interno dell'ambiente risultano essere più controllate e meno dipendenti dalle fluttuazioni esterne.

All'aumentare dei tassi di ricambi d'aria (n), le variazioni della temperatura operativa in funzione dei diversi ricambi d'aria sono meno significative rispetto a quelle causate dalla trasmittanza del vetro. Questo può essere interpretato considerando che l'effetto della ventilazione, sebbene importante per la qualità dell'aria interna e il ricambio dell'aria viziata, ha un impatto diretto minore sulla temperatura operativa rispetto alla capacità del vetro di isolare termicamente l'ambiente. Anche con tassi di ricambio d'aria variabili, la temperatura operativa all'interno della camera climatica tende a essere più influenzata dalla qualità del vetro piuttosto che dalla quantità di aria rinnovata.

Alla luce di queste osservazioni, si deduce che per migliorare il comfort termico all'interno di un ambiente, è più efficace concentrare gli sforzi progettuali sulla scelta di vetri a bassa trasmittanza. I ricambi d'aria, pur essendo cruciali per la salute e il benessere degli occupanti, non influiscono in modo altrettanto significativo sulla temperatura operativa quanto la trasmittanza del vetro.

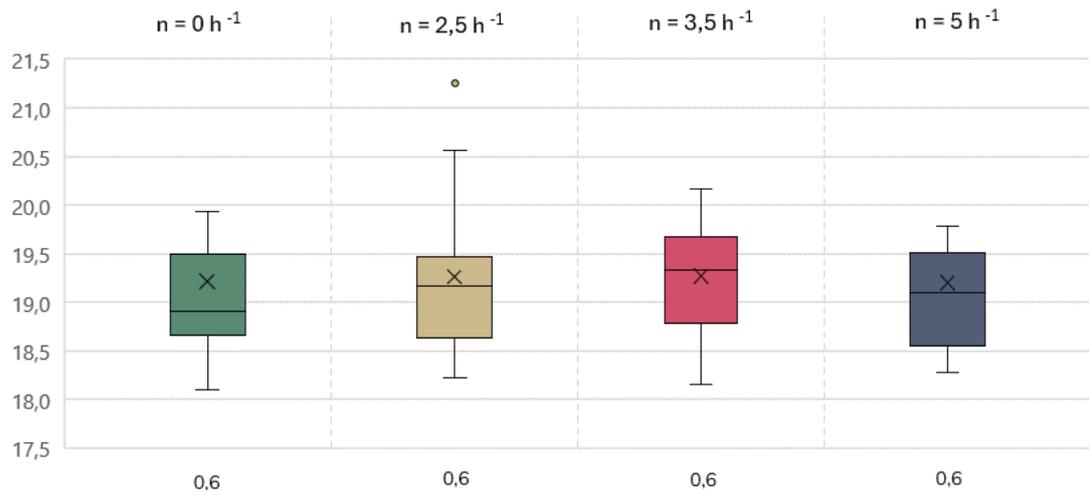


Fig.63. Valori medi totali della temperatura operativa per un'altezza fissata a 0,6 m al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

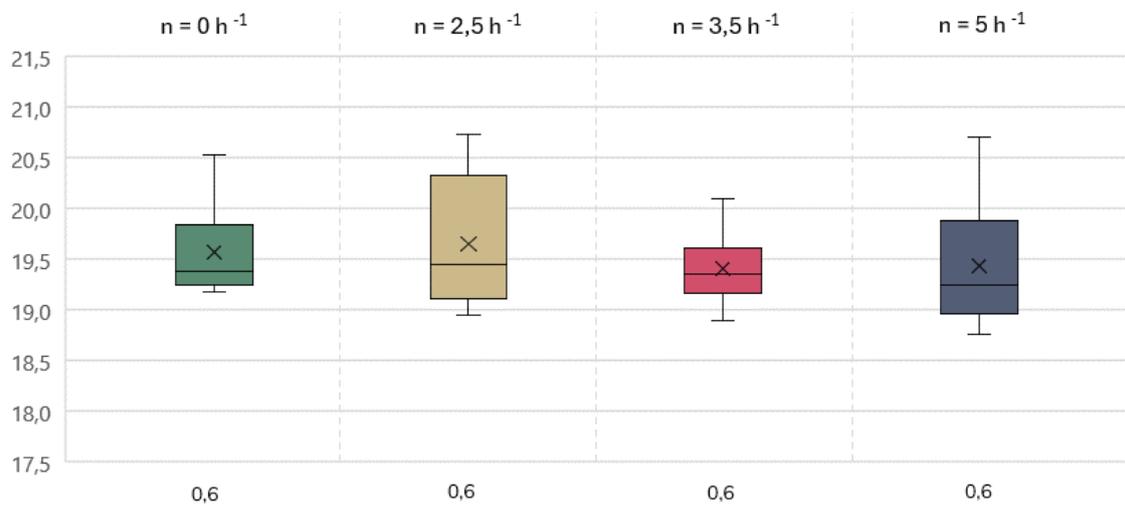


Fig.64. Valori medi totali della temperatura operativa per un'altezza fissata a 0,6 m al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

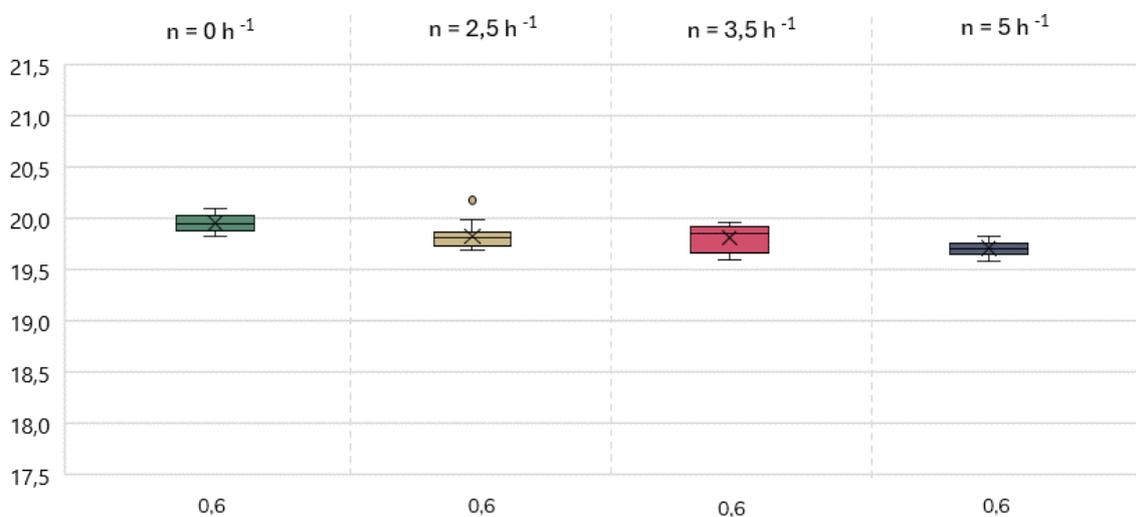


Fig.65. Valori medi totali della temperatura operativa per un'altezza fissata a 0,6 m al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

5.2 Air velocity (m/s)

I grafici riportati di seguito mostrano i valori medi totali della velocità dell'aria (m/s) all'interno della camera climatica, in funzione delle tre diverse trasmittanze del vetro, delle altezze (0,1 m, 0,6 m, 1,1m) e dei ricambi d'aria/ora. L'analisi di questi grafici ci offre un quadro esaustivo delle variazioni termiche e della distribuzione del comfort termico all'interno dell'ambiente studiato. Questa analisi permette di valutare con precisione l'influenza delle variabili ambientali e costruttive sulla qualità del comfort termico.

Dall'osservazione di questi grafici (Fig. 67, 68, 69), emerge chiaramente che, indipendentemente dalla trasmittanza del vetro, la velocità dell'aria è costantemente maggiore a un'altezza di 0,1 m dal pavimento. Questo fenomeno è attribuibile al comportamento fisico dell'aria: l'aria fredda, essendo più densa, tende a scendere e a formare correnti d'aria più intense vicino al pavimento. Al contrario, a un'altezza di 1,1 m, la velocità dell'aria risulta sempre più bassa, poiché l'aria calda, meno densa, tende a salire e a muoversi più lentamente, accumulandosi vicino al soffitto. Questo comportamento è coerente con i principi della convezione naturale, dove le differenze di densità provocate dalle variazioni di temperatura generano movimenti ascensionali e discensionali dell'aria.

Le situazioni più critiche, riguardanti i flussi d'aria, si verificano con l'uso di vetri a basse prestazioni termiche ($U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$) (Fig.67). In queste condizioni, le variazioni di velocità dell'aria tra le diverse altezze sono molto pronunciate, evidenziando una disomogeneità nella distribuzione del comfort termico. La maggiore dispersione termica attraverso i vetri a bassa prestazione amplifica le differenze di temperatura interne, provocando variazioni significative della velocità dell'aria in funzione dell'altezza.

Nel caso di vetri con prestazioni intermedie ($U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$) (Fig. 68), le differenze di velocità dell'aria tra i tre punti altimetrici sono un po' meno marcate rispetto alla situazione precedente. Questo ci indica che una riduzione della trasmittanza termica del vetro contribuisce a una minore dispersione del calore, riducendo così le variazioni di velocità dell'aria all'interno dell'ambiente.

Invece, quando si utilizzano vetri ad alte prestazioni, caratterizzati da bassa trasmittanza ($U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$) (Fig. 69) si osserva che le variazioni di velocità dell'aria tra le diverse altezze e in relazione al sistema di ventilazione meccanica controllata continuano ad esistere, ma sono molto meno evidenti, quasi impercettibili.

L'analisi dettagliata dei grafici evidenzia come le caratteristiche costruttive dei vetri influenzino significativamente la distribuzione della velocità dell'aria e, di conseguenza, il comfort termico all'interno della camera climatica. Vetri ad alte prestazioni promuovono una distribuzione uniforme della velocità dell'aria, mentre vetri a basse prestazioni mostrano variazioni più marcate, compromettendo il comfort termico.

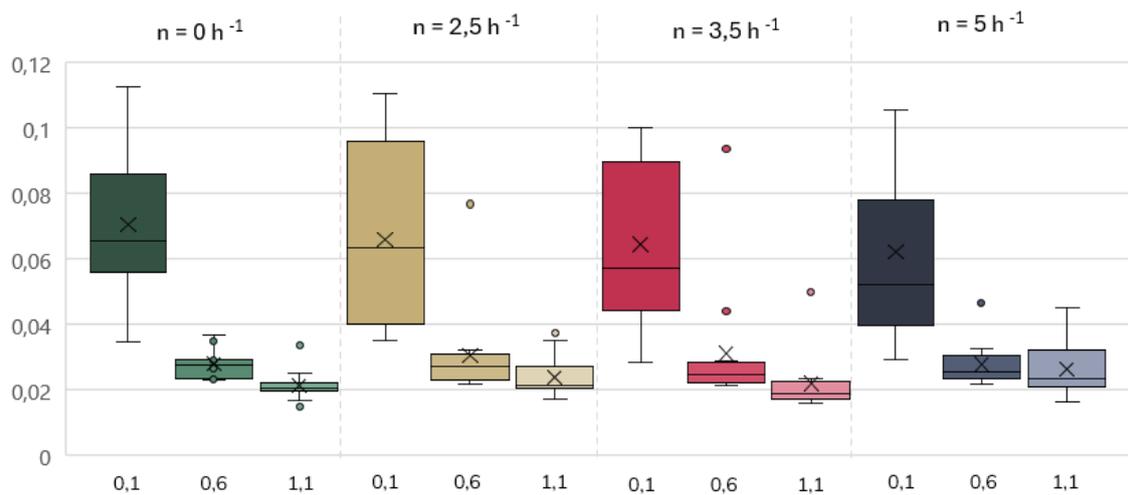


Fig.66. Valori medi totali della velocità dell'aria per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

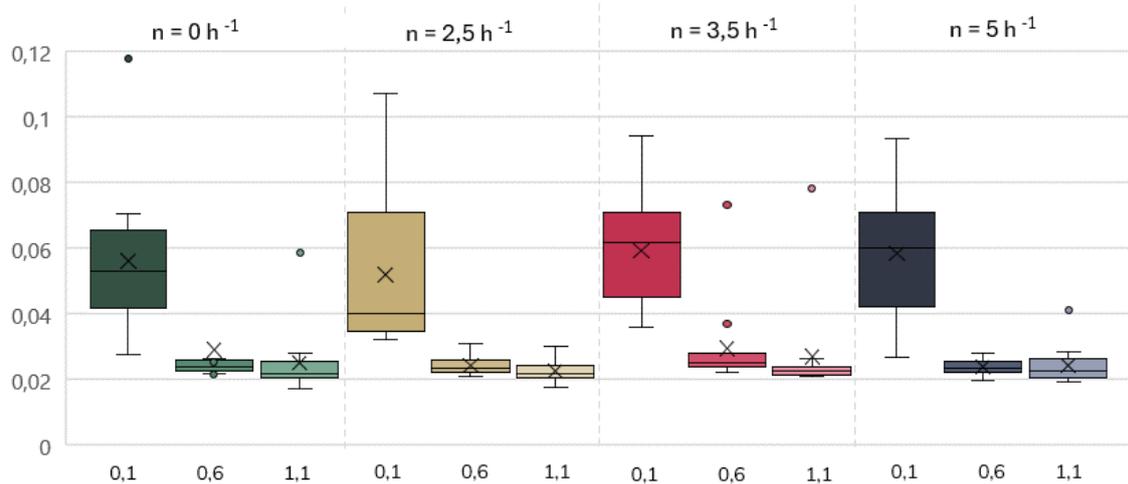


Fig.67. Valori medi totali della velocità dell'aria per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

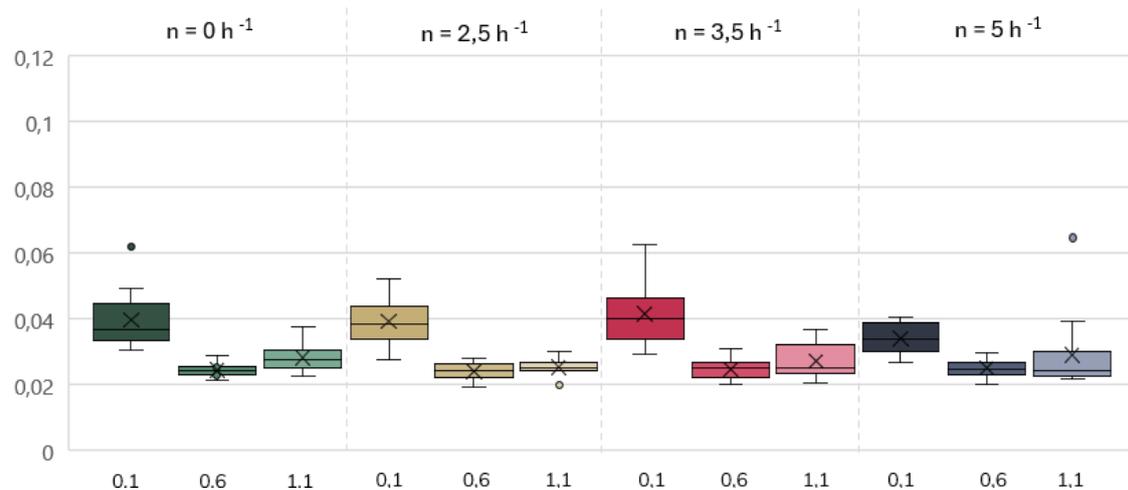


Fig.68. Valori medi totali della velocità dell'aria per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

5.3 Draught rate (%)

I grafici riportati di seguito mostrano i valori medi totali del draught rate (%) all'interno della camera climatica a tre diverse trasmittanze del vetro. Per ciascuna trasmittanza sono presenti tre diverse altezze (0,1 m, 0,6 m, 1,1m) e quattro diversi ricambi ora d'aria (n). L'analisi di questi grafici ci offre un quadro dettagliato delle variazioni termiche all'interno dell'ambiente analizzato, permettendo una valutazione approfondita dell'influenza di variabili ambientali e costruttive sul comfort termico.

L'analisi approfondita dei grafici (Fig. 70, 71, 72) rivela pattern distinti nel draught rate all'interno della camera climatica, in relazione alla trasmittanza del vetro, all'altezza rispetto al pavimento e al ricambio d'aria. Emergono chiaramente due fenomeni principali: a un'altezza di $z=0,1$ m dal pavimento si registra costantemente il maggior dis-comfort dovuto alle correnti d'aria, mentre nei due punti più alti ($z=0,6$ e $z=1,1$ m) si osservano la condizione più favorevoli con una minore incidenza di correnti disturbanti. Questi risultati possono essere interpretati con la teoria della stratificazione termica dell'aria all'interno degli ambienti interni. L'aria fredda, più densa, tende ad accumularsi vicino al pavimento, creando un gradiente termico verticale che favorisce l'emergere di correnti d'aria ad alte velocità a $z=0,1$ m.

In particolare, le situazioni più critiche, riguardanti il draught rate, si verificano con l'uso di vetri a basse prestazioni termiche ($U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$). Qui si osserva (Fig. 70) un aumento esponenziale del dis-comfort vicino al pavimento rispetto alle altezze superiori, evidenziando una maggiore penetrazione di aria fredda e un'alterazione significativa del comfort termico complessivo.

Nel caso di vetri con prestazioni intermedie ($U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$) (Fig. 71), si nota una riduzione del dis-comfort tra le altezze. L'effetto è riconducibile a una minore conduzione di calore attraverso il vetro, che limita la formazione di gradienti termici verticali e quindi di correnti d'aria disturbanti.

Con l'adozione di vetri ad alte prestazioni ($U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$) (Fig.72), caratterizzati da una bassa trasmittanza termica, si osserva una significativa diminuzione delle variazioni di dis-comfort tra diverse altezze, inclusa $z=0,1$ m dal suolo. Questo è il risultato della capacità superiore di tali vetri di isolare termicamente l'ambiente interno, riducendo drasticamente le perdite di calore e limitando la formazione di correnti d'aria fredde.

I risultati mostrano chiaramente che una riduzione della trasmittanza termica del vetro contribuisce a una minore variabilità del draught rate e a una distribuzione più uniforme del comfort termico, evidenziando l'importanza della scelta del tipo di vetro per ottimizzare le condizioni ambientali e il comfort degli occupanti.

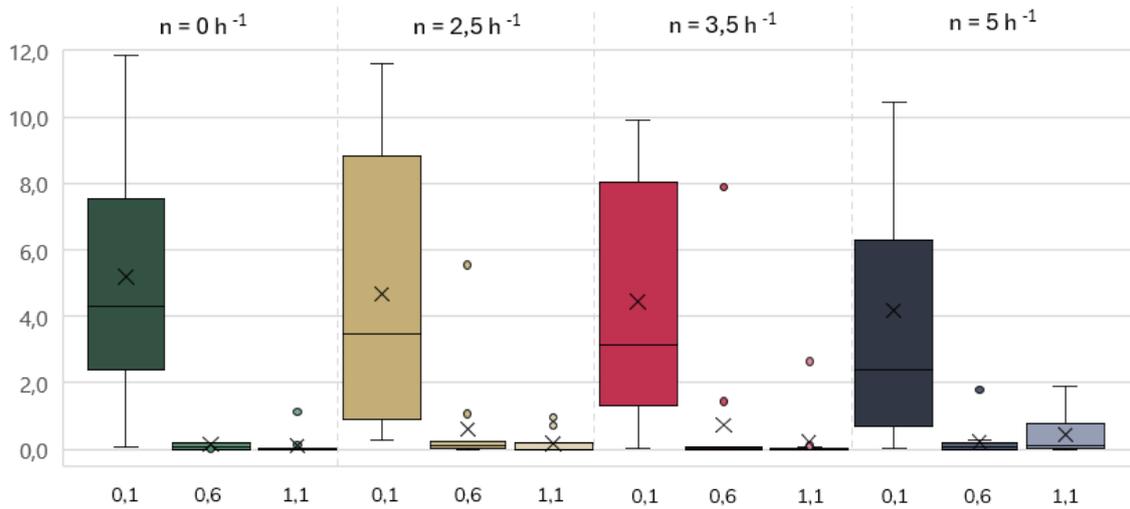


Fig.69. Valori medi totali del draught rate per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

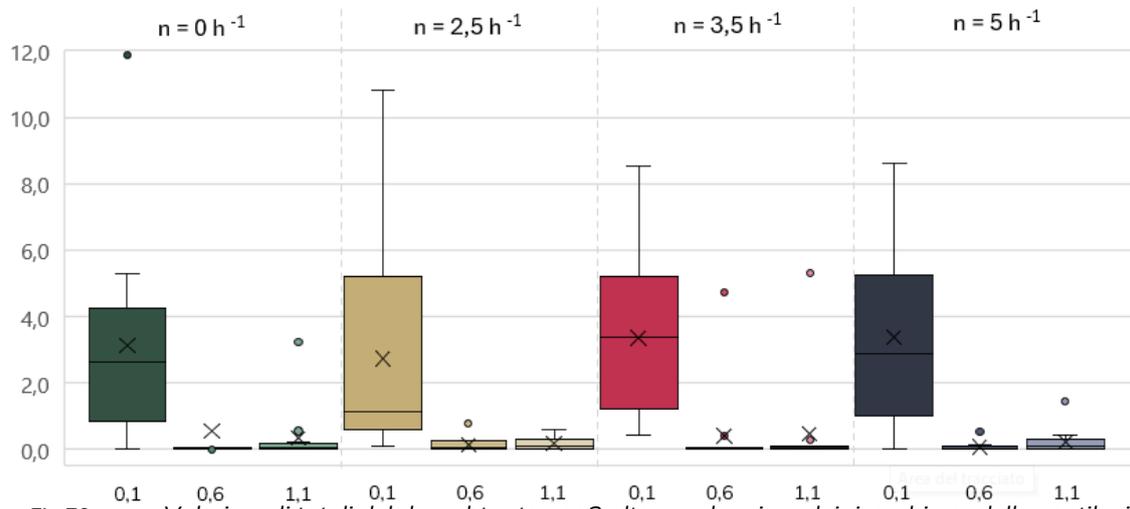


Fig.70. Valori medi totali del draught rate per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

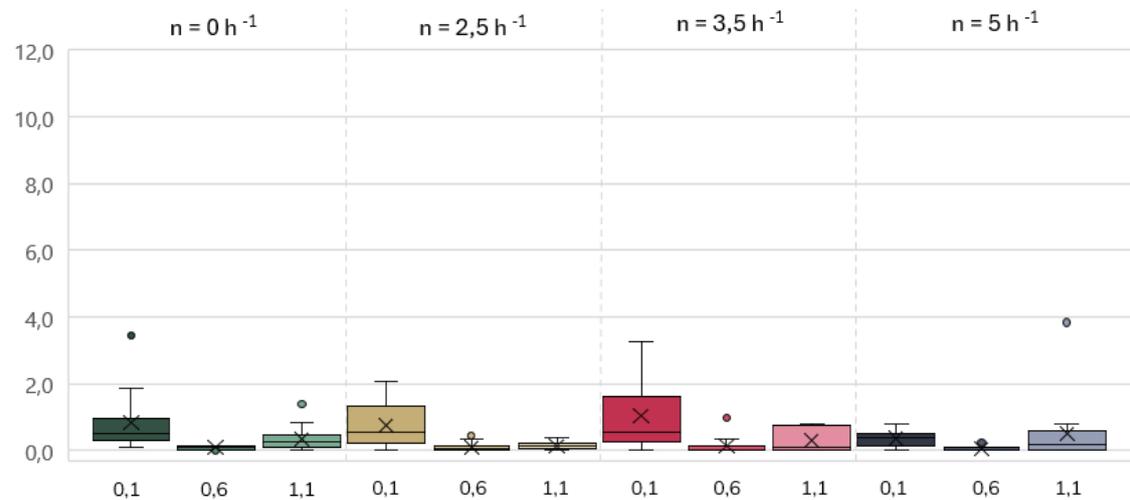


Fig.71. Valori medi totali del draught rate per 3 altezze al variare dei ricambi ora della ventilazione meccanica controllata; Trasmittanza fissata a $U_w = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

5.4 Matrice di correlazione

L'analisi di correlazione effettuata sui dati acquisiti, considerati in tutte le distanze, trasmittanze e ricambi d'aria, ha permesso di individuare i parametri maggiormente influenti sulle variabili di interesse. Utilizzando una matrice di correlazione, è stato possibile osservare quali parametri come la trasmittanza del vetro, i ricambi d'aria e la posizione influenzano maggiormente le condizioni interne dell'ambiente studiato.

Una matrice di correlazione è uno strumento statistico utilizzato per misurare e visualizzare la forza della relazione lineare tra due o più variabili. Ogni elemento della matrice rappresenta il coefficiente di correlazione tra una coppia di variabili, fornendo un'indicazione di come una variabile tenda a cambiare in relazione a un'altra. I coefficienti di correlazione variano tra -1 e 1, dove valori prossimi a 1 indicano una forte correlazione positiva, valori prossimi a -1 indicano una forte correlazione negativa e valori prossimi a 0 indicano una correlazione debole o assente.

Dall'analisi condotta (Tab. 40), è emerso che la trasmittanza del vetro incide sulla e sui valori di PMV e PPD. La trasmittanza del vetro mostra una correlazione inversa con il PMV e il PPD, con coefficienti rispettivamente pari a -0,732 e 0,737. Questo suggerisce che un aumento della trasmittanza del vetro, che implica una maggiore quantità di radiazione solare che penetra nell'ambiente, tende a ridurre il comfort termico percepito, riflettendosi in valori peggiori di PMV e PPD. Inoltre, la trasmittanza del vetro ha una correlazione inversa con le temperature rilevate a 0,6 metri e 0,1 metri dal pavimento, con valori rispettivamente di -0,587 e -0,674, indicando che un aumento della trasmittanza riduce le temperature rilevate a queste altezze. Una maggiore trasmittanza aumenta la quantità di calore solare che entra nell'ambiente, riscaldando l'aria vicino al pavimento e creando un gradiente termico che può influenzare negativamente la percezione del comfort termico.

Per quanto riguarda i ricambi d'aria, la variazione da $n = 0 \text{ h}^{-1}$ a $n = 5 \text{ h}^{-1}$ non sembra avere un impatto sostanziale su nessuno dei seguenti parametri: posizione, temperatura, temperatura operativa, velocità dell'aria, draught rate, PMV e PPD. Questo risultato potrebbe essere dovuto al fatto che il range di variazione dei ricambi d'aria considerato non è sufficiente a influenzare in modo significativo le condizioni interne.

Le posizioni X e Y di acquisizione spaziale incidono in maniera poco significativa sui parametri misurati, mostrando una correlazione rilevante solo con il draught rate a 0,1 metri dal pavimento per entrambe le coordinate. Inoltre, la posizione lungo l'asse X mostra una minima correlazione anche con la velocità dell'aria al livello dei piedi. Questo indica che la distribuzione spaziale delle condizioni interne, in termini di posizione orizzontale, non ha un impatto significativo sulla maggior parte dei parametri misurati. Tuttavia, una leggera variazione del draught rate a 0,1 metri potrebbe essere legata alla configurazione del flusso d'aria vicino al pavimento, dove turbolenze locali e la vicinanza a barriere fisiche possono creare variazioni minime ma percepibili nel tasso di corrente d'aria.

Questa analisi ha evidenziato che la trasmittanza del vetro è un parametro cruciale che influisce significativamente sul comfort termico, mentre i ricambi d'aria e le posizioni di acquisizione hanno un impatto minimo nei range analizzati. Questi risultati possono essere utilizzati per ottimizzare il design e la gestione dell'ambiente al fine di migliorare il comfort termico, suggerendo che interventi mirati sulla trasmittanza del vetro potrebbero ridurre l'impatto negativo della radiazione solare sul comfort interno, mentre una ventilazione controllata e ben distribuita potrebbe migliorare la qualità dell'aria senza influenzare eccessivamente le altre condizioni climatiche interne.

Matrice di correlazione				
	Uw (W/m ² K)	n (h ⁻¹)	X	Y
Uw (W/m ² K)	1,000	0,008	-0,005	0,003
n (h ⁻¹)	0,008	1,000	-0,007	0,000
X	-0,005	-0,007	1,000	0,002
Y	0,003	0,000	0,002	1,000
T 1,1	0,001	-0,054	0,170	-0,104
T 0,6	-0,587	-0,142	0,045	-0,064
T 0,1	-0,674	-0,076	0,202	-0,151
V 1,1	-0,105	0,040	-0,083	-0,150
V 0,6	0,121	-0,017	-0,101	-0,059
V 0,1	0,340	-0,033	-0,303	0,286
Draught rate 1,1	-0,028	0,034	-0,064	-0,130
Draught rate 0,6	0,088	-0,017	-0,111	-0,061
Draught rate 0,1	0,351	-0,027	-0,302	0,300
Top 0,6	-0,380	-0,081	0,152	-0,126
PMV	-0,732	-0,053	0,076	-0,075
PPD	0,737	0,033	-0,088	0,069

Tabella 40 – Matrice di correlazione per tutte le trasmittanze, posizioni e ricambi ora d'aria.

6. CONCLUSIONI

Lo studio condotto ha focalizzato l'attenzione sull'analisi della qualità ambientale interna (IEQ) negli edifici scolastici, un tema di fondamentale importanza per il benessere e la performance degli studenti. Attraverso un'analisi dettagliata dei vari fattori che influenzano l'IEQ, come la temperatura, la ventilazione e la trasmittanza termica delle superfici vetrate, questa ricerca ha fornito una visione esaustiva delle dinamiche interne delle aule scolastiche, identificando le aree critiche e suggerendo interventi mirati per il miglioramento delle condizioni ambientali.

Le prove sperimentali condotte nella Test-Room hanno rivelato informazioni preziose sulla distribuzione della temperatura e della qualità dell'aria all'interno delle aule. Le mappe termiche e di velocità dell'aria, prodotte durante questi esperimenti, hanno evidenziato come le aree adiacenti alle finestre e vicino alle bocchette di ricircolo dell'aria siano frequentemente soggette a condizioni di dis-comfort termico e scarso ricambio d'aria.

La sperimentazione ha mostrato come la tipologia di riscaldamento incida sull'omogeneità dei risultati ottenuti:

- la stufa elettrica (EH) introduce calore in modo localizzato e non uniforme. Questo comportamento influisce direttamente sulla temperatura dell'aria nell'area circostante, creando gradienti termici (Tab. 5) che possono alterare significativamente le condizioni di test. Inoltre, influisce anche sulla velocità dell'aria (Tab. 7), la stufa genera correnti d'aria che non riflettono le condizioni di ventilazione meccanica controllata progettate.
- il radiatore elettrico ad olio (ER) ha mostrato una distribuzione del calore più uniforme rispetto alla stufa elettrica. Questo ha portato a un miglioramento del PMV e una riduzione del PPD, indicando un maggiore comfort termico per gli occupanti.

Per i precedenti motivi si è scelto di escludere la stufa elettrica e proseguire le prove di sperimentazione solamente con il radiatore elettrico.

I risultati delle prove hanno dimostrato che la trasmittanza dei vetri delle finestre esercita un impatto significativo rispetto al sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC).

Gli studi condotti con una trasmittanza fissa di $U_w = 5 \text{ W/m}^2\text{k}$ dimostra (Fig. 43 – 44- 45 -46) che, indipendentemente dall'altezza di presa (0,1 m, 0,6 m, 1,1 m), le variazioni in termini di parametri fondamentali (temperatura dell'aria (°C), temperatura operativa (°C), velocità dell'aria (m/s), e draught rate (%)) non sono significative al variare dei ricambi d'aria. Tuttavia, sono stati rilevati picchi soprattutto in prossimità del termosifone e della finestra.

Al contrario, fissando la trasmittanza del vetro della finestra a $U_w = 1\text{W/m}^2\text{k}$ (Fig. 55 – 56- 57 - 58) non si osservano variazioni significative al variare dei ricambi d'aria (n). La configurazione risultante è omogenea e senza grandi differenze tra le varie mappe di comfort, considerando tutti i parametri ambientali fondamentali.

Si è rivelato che lo scambio di calore radiativo ha un'influenza maggiore rispetto allo scambio convettivo indotto dalle variazioni di ricambio d'aria. Questo suggerisce che interventi volti a migliorare la trasmittanza delle superfici vetrate potrebbero avere un impatto più significativo sul comfort termico rispetto all'ottimizzazione del sistema di ventilazione.

Questa ricerca ha fornito un contributo significativo alla comprensione delle dinamiche ambientali interne nelle scuole. I risultati ottenuti possono essere utilizzati come base per ulteriori studi e per lo sviluppo di politiche e strategie volte a migliorare la qualità degli ambienti scolastici. Promuovere un approccio integrato alla progettazione degli spazi interni e l'adozione di soluzioni tecnologiche avanzate può contribuire a creare ambienti scolastici più salubri, confortevoli ed efficienti, con benefici a lungo termine per la società nel suo complesso.

Migliorare l'IEQ nelle scuole attraverso interventi su misura per il riscaldamento e la trasmittanza delle superfici vetrate può portare a un significativo incremento del benessere degli studenti e dell'efficienza energetica degli edifici, promuovendo ambienti di apprendimento più favorevoli e sostenibili. La ricerca suggerisce che tali interventi, se implementati correttamente, possono avere un impatto duraturo sulla salute e sul rendimento degli studenti, nonché sulla sostenibilità energetica degli edifici scolastici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Metodo Fanger.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.cabidigitalibrary.org/doi/full/10.5555/19722700268>
- [2] “Metodo fanger e metodo adattivo.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://biblus.acca.it/benessere-termoigrometrico-e-comfort-termico/>
- [3] “INDOOR GENERATION.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.theplan.it/design/indoor-generation>
- [4] M. Alwetaishi, “Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: A case study,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 6–18, 2019, doi: 10.1016/j.jksues.2017.03.001.
- [5] “Modellazione TAS EDSL.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.edsl.net/tas-engineering/>
- [6] C. Buratti, L. Barelli, and E. Moretti, “Application of artificial neural network to predict thermal transmittance of wooden windows,” *Appl. Energy*, vol. 98, pp. 425–432, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.04.004.
- [7] N. Lolli and I. Andresen, “Aerogel vs. argon insulation in windows: A greenhouse gas emissions analysis,” *Build. Environ.*, vol. 101, pp. 64–76, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.03.001.
- [8] P. F. Tavares, A. R. Gaspar, A. G. Martins, and F. Frontini, “Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in mediterranean climates,” *Energy Policy*, vol. 67, pp. 68–81, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.038.
- [9] S. Sadrizadeh *et al.*, “Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment,” *J. Build. Eng.*, vol. 57, no. June, p. 104908, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104908.

- [10] S. Haddad *et al.*, “On the potential of demand-controlled ventilation system to enhance indoor air quality and thermal condition in Australian school classrooms,” *Energy Build.*, vol. 238, p. 110838, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110838.
- [11] “Adaptive thermal comfort in Australian school classrooms.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09613218.2015.991627>
- [12] C. Cen, S. Cheng, E. Tan, and N. H. Wong, “Students’ thermal comfort and cognitive performance in fan-assisted naturally ventilated classrooms in tropical Singapore,” *Build. Environ.*, vol. 260, no. May, p. 111689, 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111689.
- [13] M. Marigo, G. Tognon, M. De Carli, and A. Zarrella, “Effects of radiant asymmetry on the thermal comfort conditions: Experiments in a test room,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 248, no. PB, p. 123248, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123248.
- [14] “Valori tipici di trasmittanza.” Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: <https://biblus.acca.it/speciale-guida-ai-serramenti/#trasmittanza-e-caratteristiche-termiche>
- [15] “Il ricambio d’aria nelle scuole secondo la legislazione vigente.” Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.ingenio-web.it/articoli/ventilazione-nelle-aule-scolastiche-calcolo-delle-portate-di-ricambio-dell-aria-e-analisi-della-normativa/>
- [16] F. Nicol, “Thermal comfort,” *Sol. Therm. Technol. Build. State Art*, pp. 164–191, 2014, doi: 10.4324/9781315074467.
- [17] “ComfortSense Dantec.” Accessed: Jul. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/thermal-comfort/comfortsense/>
- [18] “UNI EN ISO 7730: Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.” 2006.
- [19] “Thermal Manikin.” [Online]. Available: <https://pt-teknik.dk/>

- [20] “UNI EN ISO 7730:2006, Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.”
- [21] ASHRAE, “ANSI/ASHRAE Standard 55,” *ASHRAE Stand. 55*, vol. 2013, p. 76, 2020, [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- [22] I. Ministro, G. Ufficiale, and G. Ufficiale, “DECRETO MINISTERIALE 18 dicembre 1975,” vol. 1975, 1976, [Online]. Available: https://www.indicenormativa.it/sites/default/files/dm_18-12-75.pdf
- [23] V. M. Gioia, “UNI 10339,” vol. 39, no. 02, 2008.
- [24] “UNI EN 12599: Ventilazione per edifici - Procedure di prova e metodi di misurazione per la presa in consegna di impianti di ventilazione e di condizionamento dell’aria,” 2012, [Online]. Available: <https://ediliziainrete.it/norme/uni-en-125992012>