



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in:
INGEGNERIA EDILE

Tesi di Laurea:

**SVILUPPO DI UN SISTEMA SMART DI
CONTROSOFFITTO PER COMFORT MULTIDOMINIO:
OTTIMIZZAZIONE DELL'INDOOR AIR QUALITY**

*Development of a Smart Ceiling System for Multidomain Comfort: Indoor Air
Quality Optimization*

Relatrice:
Prof.ssa Francesca Stazi

Candidato:
Filippo Sfrattoni

Correlatori:
Prof. Costanzo Di Perna
Dott.ssa Serena Summa

Anno Accademico 2022 – 2023

ABSTRACT

La presente tesi riguarda lo studio sperimentale, su test room, finalizzato a realizzare un metodo di rilevazione della presenza di persone basato su una griglia di termocoppie installate sul controsoffitto della camera.

Si andrà a valutare le performance di pannelli di nuova concezione, finalizzati al miglioramento delle condizioni della qualità dell'aria.

L'obiettivo è di verificare l'efficienza di questa soluzione olistica e quantificare l'efficacia dei pannelli rispetto alle soluzioni di controsoffitto tradizionale.

A tal fine la presente tesi ha incluso una serie di attività sperimentali su una test room ed elaborazioni analitiche dei dati, che hanno permesso di dimostrare l'efficacia del sistema di rilevazione adottato e dei pannelli innovativi.

Indice

1. Introduzione.....	6
2. Obiettivi.....	9
3. Metodi e strumenti.....	10
3.1 Caso studio (Design della Test-Room).....	10
3.2 Pannelli a confronto	13
3.2 Metodo di rilevazione della presenza	15
3.2.1 Strumenti di misura	20
3.3 Metodo di controllo termico	21
3.3.1 Strumenti di misura	25
3.4 Metodo Indoor Air Quality	26
3.4.1 Strumenti di misura	35
4. Risultati.....	36
4.1 Risultati prove di rilevazione della presenza	37
4.1.1 Prova 1-5-10 minuti	38
4.1.2 Prova 1-3-5 minuti	42
4.2 Risultati IAQ.....	45
4.2.1 Velocità dell'aria	45
4.2.2 IAQ.....	52
5. Discussione.....	55
5.1 Efficacia della rilevazione della presenza.....	55
5.2 Valutazione della stratificazione dell'aria per diverse sorgenti.....	57
5.3 Efficienza di assorbimento VOC dei pannelli innovativi	59
6. Conclusioni.....	63
Bibliografia.....	64
Appendice 1	67

Appendice 2.....	75
Appendice 3.....	83

1. Introduzione

Due edifici scolastici su tre, in Italia, sono stati costruiti prima del 1976 [1]. In questi anni non c'era una particolare attenzione al tema del comfort degli occupanti, tema le cui ricerche sono state avviate dal Professor Fanger sul finire degli anni '60. Precedentemente a questi studi, ma anche per buona parte degli anni successivi, gli unici accorgimenti che venivano presi per quanto riguarda il comfort degli occupanti, si limitavano a imporre che la temperatura non scendesse, in condizioni invernali, sotto un determinato valore di progetto. Questo metodo di progettazione ha portato successivamente a diverse problematiche da dover risolvere. Una tra le più grandi si è notata di recente, quando il virus Sars Covid-19 ha evidenziato seri problemi dovuti alla mancanza di sistemi di ventilazione all'interno delle aule scolastiche. Problematica ancora più rilevante se si considera che nei Paesi sviluppati, i bambini trascorrono in media 7450 ore negli edifici scolastici durante le scuole primaria e secondaria [2].

La mancanza di sistemi di ventilazione all'interno delle aule scolastiche, ha fatto sì che, enti pubblici, come ad esempio la Regione Marche, abbiano finanziato l'installazione di unità di ventilazione con recupero di calore in alcune delle aule della regione. Queste unità di trattamento hanno risolto in parte il problema di ricambio di aria, ma hanno dato luogo ad un problema acustico in quanto l'installazione solitamente è avvenuta nei controsoffitti delle aule stesse che però non sono adeguatamente insonorizzate. Il D.P.C.M. 05/12/1997 stabilisce solamente che, per gli edifici scolastici, l'nW, ovvero l'indice di livello di rumore da calpestio normalizzato, non deve superare i 58 dB. Pertanto, la maggior parte degli edifici esistenti richiede interventi di riqualificazione per migliorare alcuni aspetti.

Tra le migliorie da apportare ci sono l'efficienza energetica, la salubrità dell'aria e il comfort, sia termico che acustico. Tali aspetti sono indispensabili per valutare la qualità complessiva di un ambiente destinato ad ospitare persone poiché influisce direttamente sul loro benessere; infatti, l'esposizione a condizioni ambientali sfavorevoli è stata associata a un decadimento delle prestazioni cognitive, nonché della salute fisica e mentale [3].

Negli ultimi decenni, gli studiosi hanno dimostrato un crescente interesse nell'interpretare la percezione umana del comfort dell'ambiente circostante al fine di creare ambienti più confortevoli e produttivi e di migliorare il benessere delle persone e la qualità della vita in un quadro sostenibile. Ciò significa che siamo alla ricerca di spazi interni che diventeranno più rispondenti alle esigenze degli occupanti in termini di indoor air quality (IAQ), fornendo

adeguate condizioni termiche, visive, acustiche e di qualità dell'aria limitando al contempo i requisiti energetici dell'edificio.

Uno degli aspetti che meno è stato misurato nel tempo, nonostante la maggior parte degli edifici siano stati progettati per gli occupanti, riguarda l'interazione uomo-costruzione [4], [5].

Secondo uno studio di Huizenga et al., infatti, solamente l'11% di 215 edifici presi come campione raggiungono l'80% di soddisfazione degli occupanti per quanto riguarda il comfort termico e solo il 26% invece raggiunge quello per l'indoor air quality [6].

Gli occupanti sono esposti ad una varietà di condizioni ambientali ben distinte tra loro, inclusi stimoli visivi, termici, uditivi ed olfattivi. Un'ampia letteratura scientifica è stata prodotta sulla valutazione di influenze di singoli domini sugli occupanti, come quelli termici, [7], [8] visivi [9] o uditivi [10].

A tal riguardo, Risetto, Schweiker e Wagner hanno svolto una ricerca relativa ad un sistema di comfort personale con ventilatori a soffitto, valutandone sia l'impatto sul comfort degli occupanti che l'efficacia di raffrescamento come sistema a basso consumo. Questi si sono dimostrati un potenziale sistema di ventilazione da soffitto personalizzati, in particolare per la ristrutturazione di edifici esistenti [11].

Le preferenze degli occupanti per l'ambiente interno ed i loro atteggiamenti però sono molto più diversificati di quanto comunemente vengono ipotizzati dai ricercatori. Oltre a ciò, questi comportamenti potrebbero cambiare nel corso del ciclo di vita di un edificio. Per risolvere questo problema, si è sempre di più alla ricerca di un cambio di paradigma, in base al quale i professionisti passano dal vedere gli occupanti come fonte di aumento di calore interno e di contaminanti, che si accontentano di condizioni ambientali interne, alla comprensione che esiste un'interazione bidirezionale e dinamica tra occupanti e edifici [12]. Un esempio è il controllo incentrato sugli occupanti (OCC), che prevede il rilevamento dell'effettiva qualità dell'ambiente interno, della presenza degli occupanti e delle interazioni di essi con gli edifici per raggiungere livelli di efficienza energetica e di comfort elevati [12].

Purtroppo, sono molto pochi gli studi e le ricerche riguardanti l'esposizione degli occupanti a sistemi multi-dominio. Questi, a differenza della ricerca a dominio singolo, analizzano almeno due dei quattro domini del comfort (termico, visivo, qualità dell'aria e acustico).

Una soluzione, ad esempio, riguarda l'utilizzo di pannelli multifunzionali innovativi come controsoffitti. Questi, hanno un costo relativamente basso rispetto ad altre soluzioni e sono di facile installazione.

Jin et al. [13] hanno condotto uno studio sulla valutazione di diversi aspetti relativi al comfort, ovvero proprietà termiche, acustiche e controllo dell'umidità di pannelli multifunzionali realizzati in fibre di juta, un materiale di fibre naturali, mescolate con fibre di poliestere per rivestimenti murali interni. Questi pannelli si sono dimostrati un prodotto valido dal punto di vista termico, con eccellenti proprietà di isolamento comparabili con prodotti commerciali a base di lana di vetro/roccia ed anche migliori di quelle della maggior parte degli isolanti termici naturali. I pannelli hanno anche mostrato buone proprietà di assorbimento acustico soprattutto nelle frequenze medio-alte, ed un buon potenziale nel controllo dell'umidità con elevati rapporti di desorbimento ed una quantità massima di assorbimento superiore al valore limite standard.

Un'altra applicazione interessante è quella messa a punto da Seyedmostafa et al. Hanno approfondito l'utilizzo di sistemi a soffitto radiante con raffreddamento incorporato di tipo PCM [14]. Questi sono sistemi contenenti un composto organico o inorganico, in grado di immagazzinare e rilasciare energia termica in forma latente quando passa da uno stato fisico all'altro, pressoché a temperatura costante [15]. Assorbono il calore sensibile durante il giorno sciogliendosi (ciclo di scarica); durante la notte, poi, l'acqua refrigerata che circola attraverso i pannelli, assorbe il calore accumulato dai pannelli stessi e lo porta a solidificare di nuovo (ciclo di carica). Questo sistema ha mostrato soddisfacenti prestazioni in termini di accumulo di energia termica, utile a soddisfare i picchi di richiesta di raffrescamento durante il giorno. Per quanto riguarda il comfort termico all'interno del locale, si è fatto riferimento alla ISO 7730:2005, questa definisce tre classi di comfort termico interno: Classe A ($24,5 \pm 1$ °C), Classe B ($24,5 \pm 1,5$ °C), Classe C ($24,5 \pm 2,5$ °C) [16]. È stato osservato che il sistema PCM installato è stato in grado di mantenere il comfort interno per lo più entro la Classe C, questo a causa del sovraraffreddamento nelle mattine successive al processo di ricarica ed anche a causa delle limitazioni della cabina di prova. Migliori sono stati i risultati per quanto riguarda il controllo dell'umidità relativa che si è attestata attorno al 54 ± 5 % per tutta la durata della prova, ovvero l'intervallo raccomandato da ASHRAE per un ambiente confortevole [16]. Infine, la temperatura verticale con l'utilizzo di questi pannelli è sempre stata inferiore ai 2 °C, che, come stabilito sempre nella ISO 7730, è il criterio per essere nella Classe A.

Un'altra applicazione di questa tipologia di moduli PCM è stata utilizzata da Yong-Kwon et al.: hanno integrato a questi pannelli a cambiamento di fase, un modulo termoelettrico (TEM) basato sull'effetto Peltier in sostituzione ad un pannello di raffreddamento radiante non idraulico.

2. Obiettivi

Dall'analisi della letteratura è emerso che il dibattito sulla ricerca è ancora aperto riguardo ai temi di comfort localizzato, personalizzato e multidominio. L'obiettivo del presente lavoro è quello di sviluppare una soluzione per migliorare il comfort degli occupanti all'interno delle aule scolastiche ottimizzando gli aspetti termici, acustici e di qualità dell'aria e perseguendo istanze di risparmio energetico.

Questa soluzione verrà implementata tramite dei controsoffitti che saranno sia passivi che attivi (Figura 1). Passivi in quanto grazie alle proprietà e caratteristiche dei materiali saranno in grado di migliorare le condizioni di comfort all'interno dell'ambiente. Attivi perché saranno dotati di sensori e attuatori in grado di gestire per zone il controllo degli impianti di ventilazione oppure di pannelli radianti. La soluzione permetterà di migliorare il comfort e garantire risparmio energetico in quanto gli ambienti della stessa stanza saranno gestiti per

zona.

L'obiettivo di questa tesi è quello di andare ad effettuare analisi preliminari sia sulla parte sensoristica che sui pannelli innovativi proposti che saranno successivamente installati all'interno delle aule. Questo verrà effettuato in due fasi: la prima fase riguarda la messa a punto della test room con una

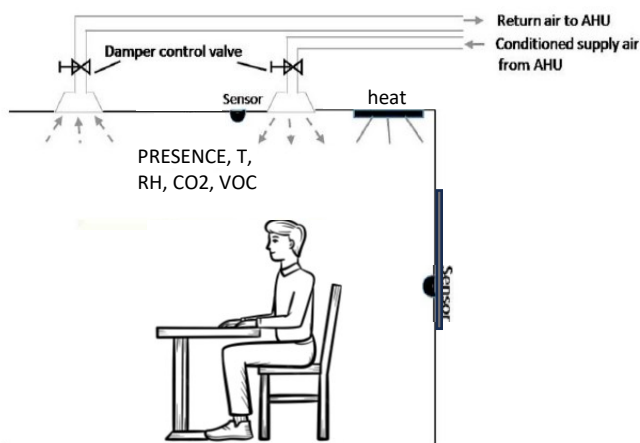


Figura 1: Esempio di soluzione proposta

griglia sensori termici utili alla rilevazione della presenza di persone; la seconda fase invece riguarda il confronto tra controsoffitti tradizionali in cartongesso e controsoffitti innovativi dal punto di vista della prestazione acustica e dell'IAQ.

3. Metodi e strumenti

3.1 Caso studio (Design della Test-Room)

Per eseguire le valutazioni sui componenti edilizi innovativi, oggetto della tesi, è stata messa a punto una test room (Figura 2), che simulasse una porzione delle aule scolastiche. Questo ambiente è situato all'interno di uno dei laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM), presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche. La struttura della stanza posta all'interno del laboratorio è realizzata con tecnologia a secco ed è costituita da quattro pareti verticali, che delimitano il perimetro dell'ambiente e da due orizzontamenti: pavimento e solaio di copertura.



Figura 2: Test Room

Lo spazio rettangolare della stanza climatica misura 3,4 m per quanto riguarda il lato corto posto perpendicolare alla parete finestrata del laboratorio e 4,4 m il lato lungo, per una superficie totale di 14,96 m². L'altezza interna tra pavimento e controsoffitto misura 2,7 m

per un volume totale dell'ambiente di $40,39 \text{ m}^3$. Tra il pavimento della test room e quello del laboratorio dove essa è situata, è presente un'intercapedine aperta di 40 cm. Il solaio di calpestio della test room risulta quindi rialzato per isolare al meglio i due ambienti, sia dal punto di vista termico che dal punto di vista acustico.

Di seguito una pianta (Figura 3) e una sezione (Figura 4) con le varie dimensioni della stanza in questione.

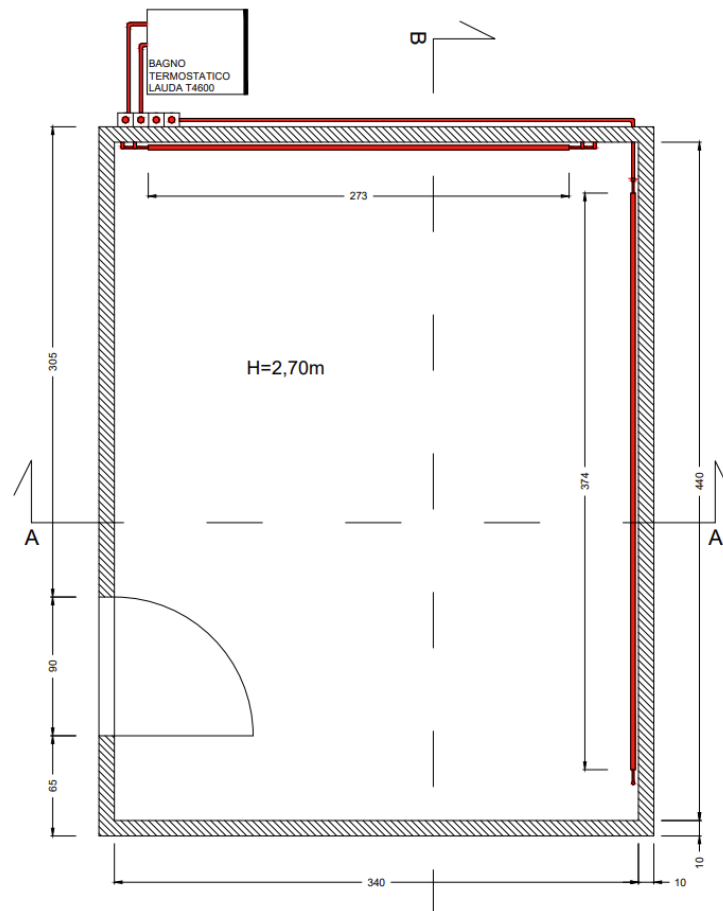


Figura 3: Pianta Test Room

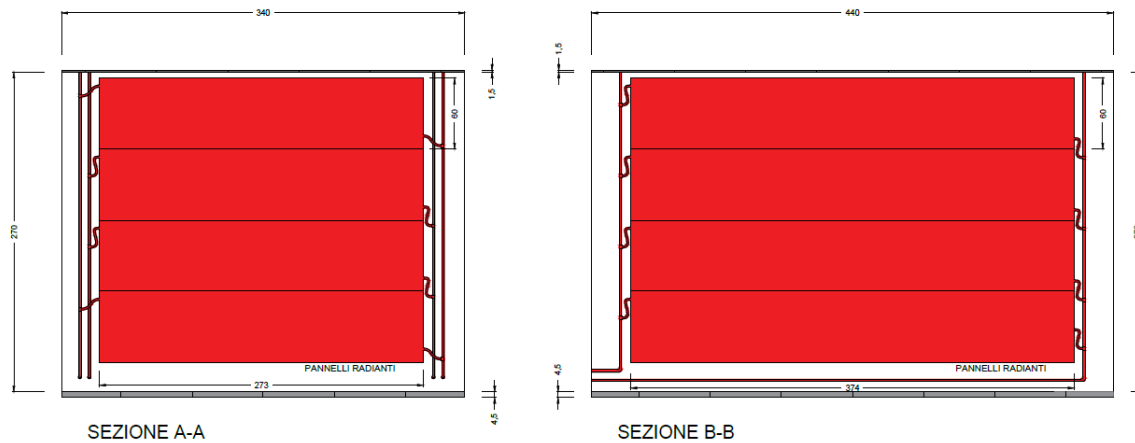


Figura 4: Sezioni della Test Room

Il pacchetto delle pareti perimetrali di spessore 0,04 m è costituito da un pannello in cartongesso dello spessore di 0,01 m e da un pannello in polistirene dello spessore di 0,03 m per limitare le dispersioni termiche dell'involucro. Il pavimento flottante è realizzato con pannelli di legno compensato e barriera al vapore in alluminio dello spessore di 0,05 m, mentre la copertura è realizzata con pannelli di controsoffitto in cartongesso da 0,60 x 0,60 m, appoggiati su un telaio di alluminio ancorato al soffitto del laboratorio.

L'ambiente in questione è dotato di impianti di riscaldamento e di raffrescamento. Quello utilizzato per le valutazioni svolte per questa tesi è un impianto a pannelli radianti a parete disposto su due delle quattro pareti verticali. Nel nostro caso, dato che le prove sono state svolte tra aprile e settembre, all'interno dei pannelli circolava acqua fredda, con il fine di diminuire il calore sensibile, e quindi la temperatura, all'interno dell'ambiente.

L'acqua circolante viene raffrescata da un refrigeratore/riscaldatore Lauda T4600. Questo sistema ha una potenza di refrigerazione (misurata con etanolo in circolazione) di circa 4 kW, un consumo di 8,5 kW ed una stabilità di $\pm 0,20$ K. Il refrigeratore è in grado di erogare un flusso massimo di 40 l/min, esercita una pressione di 3,2 bar ed utilizza come gas refrigerante l'R 404 a. L'acqua refrigerata viene poi distribuita nei pannelli, quattro posti in parallelo lungo la parete Nord e altri quattro posti in parallelo a due a due sulla parete Ovest. Questa distribuzione avviene attraverso un collettore a tre uscite dove è possibile regolare il flusso attraverso l'apertura e chiusura di una valvola per ciascuna uscita.

3.2 Pannelli a confronto

L'elemento centrale di questo lavoro è l'utilizzo e l'impatto che diversi controsoffitti hanno nella regolazione del confort degli occupanti.

La prima tipologia di pannelli analizzati è quella che si trova nella maggior parte dei locali scolastici (Figura 5) sono realizzati in fibre minerali, versatili e sorrette da un telaio in alluminio. Hanno una dimensione di 600x600x12mm, un indice di riflessione luminosa di circa l'88% e un indice di assorbimento acustico α_w di circa 0,55 calcolato secondo EN ISO 11654.



Figura 5: Controsoffitto tradizionale

La seconda tipologia (Figura 6: Controsoffitto innovativo), invece, è costituita da pannelli innovativi, realizzati con un tessuto in mediafiltrane in polistirene, ovvero un foglio composto da carboni attivi (Figura 7), utilizzato per l'abbattimento di gas o particelle inquinanti. La particolarità di questi materiali sta nella capacità di abbattere gli inquinanti presenti nell'aria grazie al fenomeno dell'adsorbimento che avviene tra il tessuto a carboni attivi e il particolato presente nell'aria. Questo comporta anche un'importante azione neutralizzante sui virus e batteri a contatto con la tecnologia applicata.

Il pannello è dotato di certificazione Indoor Air Comfort® che ne convalida le bassissime emissioni di VOC (volatic organic compoud) in ottica di un'elevata qualità dell'aria nell'ambiente interno nel rispetto dei principali protocolli internazionali, tra cui French VOC Regulation, Italian CAM Edilizia, BREEAM International e LEED. Inoltre, ha una "Classe di rilascio di formaldeide E1" secondo norma UNI EN 13964, ed è costituito da materiali riciclati per più del 60% del suo peso ed è riciclabile a fine vita.



Figura 6: Controsoffitto innovativo



Figura 7: Zoom carboni attivi

Oltre a contribuire al miglioramento della qualità dell'aria attraverso il tessuto superficiale, i nuovi pannelli presentano anche specifiche prestazioni acustiche. Analizzando la struttura principale, infatti, sono costituiti da un pannello fonoassorbente monofacciale avente dimensioni di 600x600x35mm come riportato in Tabella 1: Dimensioni pannelli innovativi, indicato per la riduzione del riverbero in ambienti interni, costituito da un pannello in fibra di poliestere termoformato a densità variabile. La facciata a vista è a sezione convessa, rivestita da tessuto in poliestere autoestinguente Trevira Cs®.

Il pannello mostrato in Figura 8 ha un coefficiente di fonoassorbimento α_w pari a 0,9 in accordo con la norma UNI EN SO 11654, ottenuto da test eseguiti in camera riverberante secondo norma UNI EN ISO 354.

CODICE PANNELLO	TIPOLOGIA	A(mm)	B(mm)	C(mm)	m ²	Kg/PANNELLO
LP71106063	Monofacciale	600	600	35	0,36	1

Tabella 1: Dimensioni pannelli innovativi

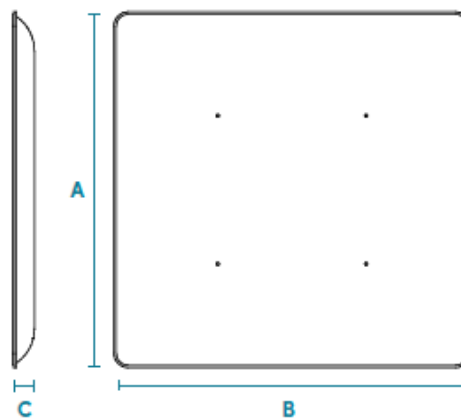


Figura 8: Dimensioni pannello

3.2 Metodo di rilevazione della presenza

Per poter riuscire a rilevare la presenza delle persone all'interno dell'ambiente, abbiamo adottato un metodo sperimentale basato su una griglia di termocoppie schematicamente installate sul controsoffitto della test room come mostrato nella pianta in Figura 9 e nella sezione

in

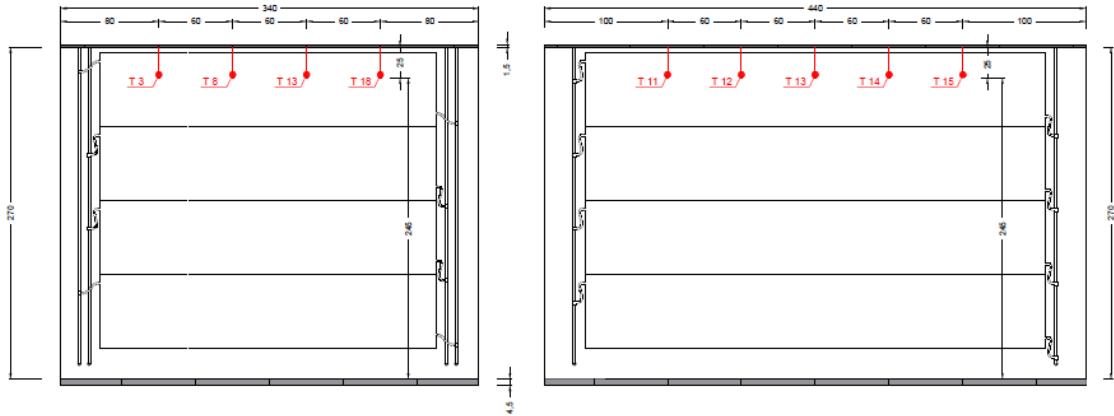


Figura 10. Questo schema dovrà poi essere riprodotto in maniera analoga sui pannelli al cui interno verranno installati sensori di temperatura per mappare in maniera precisa la distribuzione di temperatura all'interno controllato.

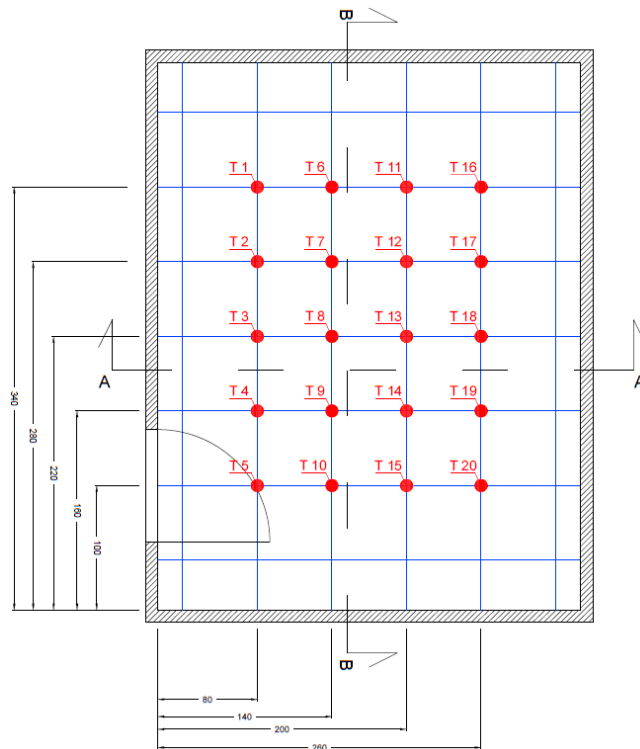


Figura 9: Pianta posizioni termocoppie Test Room

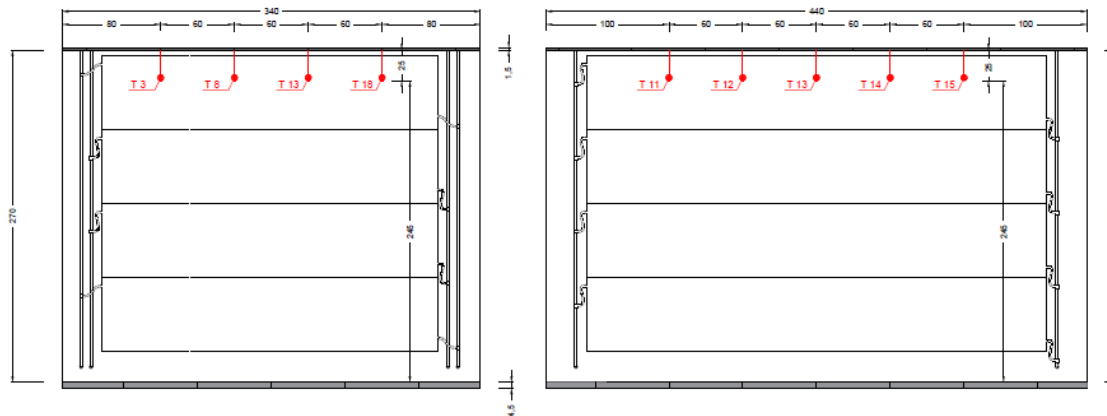


Figura 10: Sezioni posizioni termocoppie Test Room

Il primo passo per la messa a punto, ha riguardato l'installazione delle termocoppie di tipo T Figura 14, è composto da due fili metallici in 55% Rame (Cu) (+) e 45% Costantana (Cu-Ni) (-). Il suo intervallo di misura va da $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una sensibilità di $48,2\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. La Termocoppia Tipo T è molto stabile e viene spesso utilizzata in applicazioni a temperature basse ma poiché tende ad ossidarsi rapidamente se esposta sopra l'intervallo sopracitato, viene utilizzata principalmente per scopi di ricerca.

Questa tipologia di termocoppie ha la necessità di avere un'amplificazione del segnale in quanto ha un coefficiente Seebeck di $38,7\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.

Il segnale viene amplificato tramite un punto di zero ed è stato utilizzato un Kaye K170 Figura 17, che ha un range operativo di temperature tra i 5 e i $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una accuratezza di $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

Per leggere questi dati si ha bisogno ovviamente di un voltmetro. Nel nostro caso è stato utilizzato un Aligent 34420A Figura 16, questo strumento ha un range di misurazione molto ampio che va da -210 fino a 1820°C , con una risoluzione di $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ ed un'accuratezza di conversione di $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

Per acquisire i dati digitalmente è stato utilizzato un modulo di acquisizione dati HP 34901A della Hewlett-Packard Figura 15. Il dispositivo ha un range operativo che va da 0 a 50°C ed un'accuratezza di $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$. Abbiamo un errore totale quindi di $\pm 0,9^{\circ}\text{C}$.

Dopo aver posizionato le termocoppie sul controsoffitto Figura 11, disponendole sull'intersezione dei telai in modo da avere un ancoraggio provvisorio, si è passati al cablaggio con i sistemi di lettura.



Figura 11: Installazione delle termocoppie

Il primo cablaggio è stato quello tra le singole termocoppie e il punto di zero Figura 13. Questo strumento è stato poi connesso con il modulo di acquisizione dati HP 34901A Figura 12 che permette di effettuare la lettura tramite il collegamento di quest'ultimo al voltmetro Aligent 34420A.

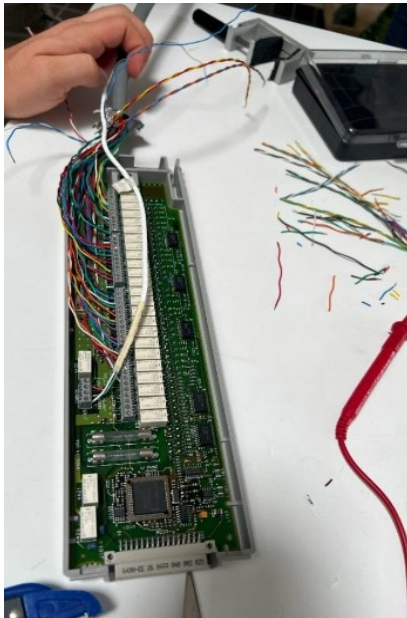


Figura 12: Cablaggio del modulo di acquisizione HP 34901A



Figura 13: Cablaggio termocoppie con punto di zero K170

Nella Tabella 2 vediamo le caratteristiche tecniche dei dispositivi installati in questa prima fase.

Dispositivo	Descrizione	Unità di misura	Range operativo	Errore
Kaye K170	Punto di zero	°C	5 a 40	±0,05
Aligent 34420	Voltmetro	°C	-200 a 400	±0,05
HP 34901A	Modulo di acquisizione	°C	0 a 50	±0,8

Tabella 2: Caratteristiche dispositivi utilizzati

Per il controllo, il salvataggio dei dati e per la conversione da μV a $^{\circ}\text{C}$ di questo sistema è stato utilizzato un PC operante con Windows 2000. Il software utilizzato è uno SCADA, (Supervisory Control And Data Acquisition), installato su personal pc o server e permette la realizzazione, il funzionamento e la gestione di sistemi di supervisione, controllo e telecontrollo senza dover necessariamente scrivere codici attraverso uno specifico linguaggio di programmazione. Questo supervisore va a programmare il PLC all'interno del sistema del nostro impianto.

Un sistema SCADA moderno può realizzare funzioni come:

- Acquisizione dati mediante opportuni driver di comunicazione verso gli apparati in campo, come microcontrollori o PLC, a loro volta connessi ai sensori o agli attuatori.
- Rappresentazione del dato sullo schermo di un PC, all'interno di un web-browser o sullo schermo di uno smartphone. Il dato può essere rappresentato sia come grandezza che sotto forma di animazione grafica.
- Interazione con sistemi di livello superiore, una funzione che è sempre più richiesta e che prevede che lo SCADA possa funzionare come "Gateway" fra il processo e i sistemi di livello superiore.

Le prove effettuate sono servite a valutare l'efficacia della griglia di termocoppie installata a soffitto. L'obiettivo era quello di rilevare la presenza di una persona all'interno di un ambiente controllato. Per poter riprodurre la persona all'interno della test room è stata utilizzata una lampada da 100 W, che è la potenza che eroga una persona a riposo in un ambiente quando si trova in condizioni di comfort. Per effettuare queste prove, sono stati scelti intervalli di accensione differenti, per verificare l'efficacia del sistema realizzato. Come prima prova quello che si è fatto è stato andare a collocare la lampada in una delle quattro zone in cui abbiamo diviso la test room. Dopo averla posizionata correttamente, si usciva e si attendeva che le temperature all'interno dell'ambiente fossero stabili. Questo,

come potremmo vedere dai grafici successivi, non è sempre stato facile in quanto le prove sono state effettuate in una zona del Dipartimento con una parete quasi interamente finestrata e dove nel pomeriggio si aveva un'alta quantità di radiazione solare trasmessa dalle finestre. Per la prima prova effettuata, sono stati programmati dei periodi di accensione e spegnimento tramite uno script realizzato in Home Assistant. Questo script prevedeva:

- Primo periodo di assestamento in quanto era stata aperta la porta;
- 1 min accensione lampada;
- secondo periodo di assestamento;
- 5 min accensione lampada;
- terzo periodo di assestamento;
- 10 min accensione lampada;
- quarto periodo di assestamento;
- spostamento della lampada in un'altra zona della test room.

I periodi di assestamento tra una prova e l'altra erano di circa dieci minuti. Il primo, ovvero quello successivo al posizionamento della lampada, è stato generalmente di dieci minuti, gli altri erano generalmente di cinque minuti a meno di evidenti aumenti o diminuzioni della temperatura nell'ambiente.

La seconda prova realizzata, sempre per quanto riguarda la valutazione del sistema di rilevazione delle temperature, era identica alla prima esecuzione se non per il fatto che variano i periodi di accensione della lampada: da cinque minuti si è passati a tre minuti e da dieci minuti si è passati a cinque. Quindi si sono ridotti i periodi di accensione per valutare se il sistema riuscisse a rilevare la presenza della persona anche in caso di minor tempo di permanenza.

3.2.1 Strumenti di misura

La strumentazione utilizzata per analizzare le misure date dalla griglia di temperature del metodo sperimentale è composta da:



Figura 14: Termocoppia di tipo T utilizzata



Figura 15: Agilent HP34420A, micro-ohmmetro a bassa resistenza



Figura 16: Modulo di acquisizione HP 34901A



Figura 17: K170 Ice Point Reference

3.3 Metodo di controllo termico

Il lavoro condotto all'interno della test room ha riguardato l'identificazione di potenziali soluzioni per garantire una misurazione accurata dei parametri ambientali che verranno successivamente implementate nelle aule scolastiche. Grazie alle rilevazioni pregresse effettuate in queste aule, siamo ben consapevoli delle sfide e dei problemi associati all'ambiente scolastico.

L'interesse di questo sistema ha come fine ultimo quello di essere in grado di andare a migliorare il comfort all'interno degli ambienti scolastici. Ciò significa che questo insieme di sensori ed attuatori dovrà essere replicato nelle aule che per la presenza di studenti e di insegnanti non permette di andare a installare sistemi intrusivi, quindi, è stato necessario adottare una sensoristica di facile installazione, sistemi che siano di difficile accesso, che non creino disturbo per gli occupanti e che non prevedono cablaggi pesanti ma collegamenti light, ovvero attraverso l'utilizzo di pile.

Per andare a gestire il complesso di sensori e attuatori è stato utilizzato un sistema Home Assistant Figura 18, un software di domotica che permette di gestire dispositivi smart in una rete di automazione domestica e ne gestisce il traffico e le comunicazioni.

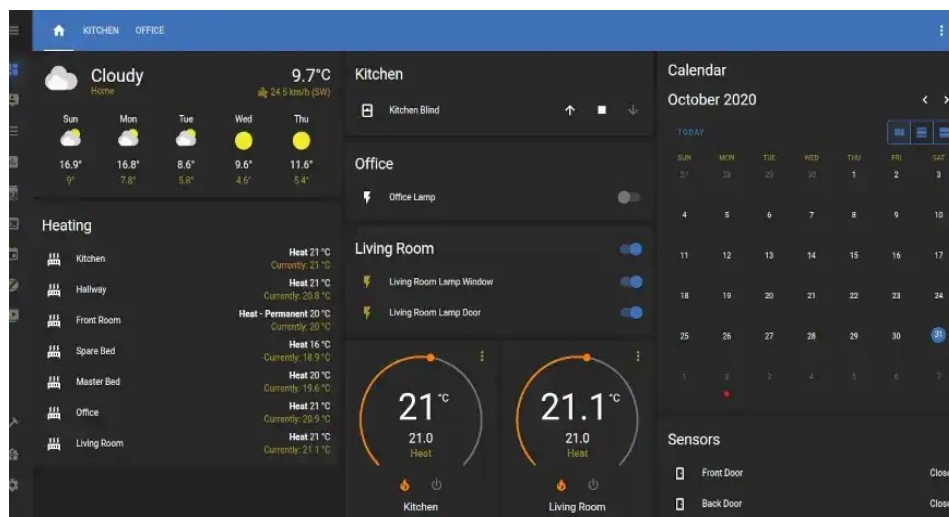


Figura 18: Interfaccia software Home Assistant

Questo è un programma gratuito e open source, ma soprattutto ha un grande vantaggio, non si basa sul cloud ma sulla rete locale. Questo significa che per funzionare non si deve connettere a server remoti, ma tutto rimane nella rete locale, con due implicazioni immediate e importanti: velocità e sicurezza. Essendo locale, vi è la necessità di installarlo su un

dispositivo (PC). Per ragioni di comodità, il dispositivo utilizzato è un Raspberry Pi 4 Figura 19.



Figura 19: Scheda dispositivo Rasoberry Pi 4

Raspberry Pi è un mini pc, un dispositivo hardware completo racchiuso in un singolo board abbinato a una piattaforma di programmazione. È una piccola scheda madre grande quanto una mini-calcolatrice, con una configurazione principale che prevede una porta LAN Wi-Fi, ingressi USB e HDMI, 1 slot per schede SD e un'uscita audio jack stereo, con una porta microUSB per l'alimentazione. A seconda del modello sono presenti molti altri connettori, per collegare devices esterni come display LCD e perfino webcam.

La scheda supporta il sistema operativo Linux, oltre ovviamente alla piattaforma nativa Raspberry Pi OS. Il modello della scheda da noi utilizzato è il Raspberry Pi 4, il board dispone di un processore quad core A72 a 1,5 GHz, con 4 GB di RAM, Ethernet Gigabit e modulo LAN wireless dual band. Per la connettività sono presenti un adattatore USB-C, 2 porte USB 2.0, 2 ingressi USB 3.0 e il Bluetooth 5.0.

Sono state scelte diverse tipologie di sensori, che possono rilevare temperatura, umidità, e CO2.

L'obiettivo finale è quello di andare a creare un sistema di controllo automatizzato tra i sensori installati e gli impianti che sono presenti all'interno delle scuole, ad esempio aumentare la potenza di ventilazione delle unità di trattamento aria all'aumentare della concentrazione di CO2 nell'ambiente. Al fine di valutare l'efficacia del sistema, sono state effettuate prove atte a caratterizzare lo schema di termocoppie installato sul controsoffitto. Per effettuare questo, è stato utilizzato un sistema che simulasse la presenza di una persona

all'interno della test room, in particolare è stata collocata una lampada da 100 W all'interno dell'ambiente con la possibilità di essere accesa da remoto. Per accendere e spegnere la lampada senza dover entrare all'interno della stanza e quindi senza causare alterazioni delle temperature, si è utilizzato un relè Shelly plus 1PM Figura 20. Lo Shelly Plus 1PM è un interruttore a relè WiFi, che permette di controllare un circuito elettrico fino a 3,5 kW e misurare il consumo di energia. Può essere adattato a una scatola da parete standard, dietro prese di corrente e interruttori della luce o in altri luoghi con spazio limitato. Come si evince dalla sigla "PM", lo Shelly in questione ha inoltre la funzione di "Power Measurement". Quest'ultima ci consente di misurare la potenza istantanea che consuma la lampada collegata allo Shelly. In aggiunta, è dotato di connessione Bluetooth per una facile associazione alla rete e successiva configurazione sull'App Shelly o nel nostro caso integrato con Home Assistant.

In seguito, è stato realizzato uno script che accendesse e spegnesse la lampada da 100W ad intervalli definiti e temporizzati per condurre le prove necessarie, sia a validare il sistema realizzato con le termocoppie a soffitto sia a verificare il funzionamento dell'intero sistema realizzato nella seconda fase.

Per il rilevare le temperature e l'umidità interne dell'ambiente sono stati installati e configurati su Home Assistant dei sensori Shelly H&T Figura 21. I dispositivi lavorano attraverso una batteria di tipo CR123A a 3V in DC e dispone di oltre un anno di durata.

Per poter fare un confronto è stato installato anche un altro sensore, l'Aranet 4 Home Figura 22: è un dispositivo progettato per il monitoraggio della qualità dell'aria interna – CO₂, umidità relativa, temperatura e pressione atmosferica. Generalmente, le misurazioni effettuate dai sensori di temperatura si basano su due valori: il primo è la frequenza di campionamento, un valore impostato di fabbrica dalla casa produttrice; il secondo invece è la risoluzione che esso usa durante il periodo di campionamento. La risoluzione di un sensore è definita come la minima variazione della variabile misurata che dà luogo ad una variazione rilevabile dell'uscita.

Ciò che si è visto è che l'Aranet aveva una risoluzione molto maggiore rispetto al sensore della Shelly: mentre il primo mostra un dato o ogni cinque minuti, se la temperatura rimane costante, oppure se si ha una variazione di temperatura di 0,2 °C, il secondo ha un tempo di rivelazione di circa trenta minuti a temperatura costante e una risoluzione sulla temperatura di circa 1°C.

Un altro dispositivo testato durante la messa a punto della test room è la stazione meteo Netatmo Figura 23, un dispositivo che permette di rilevare, misurare e memorizzare i dati

relativi all'atmosfera e al meteo. Dipendendo dalla tipologia e funzionalità, questa fornisce informazioni sia sulla qualità dell'aria interna che esterna. Ma non solo: grazie al microfono integrato, riesce inoltre a rilevare anche il livello di inquinamento acustico.

Il livello di precisione è molto elevato ed i dati registrati si dimostrano ovviamente più accurati di quelli di una stazione meteo posta a diversi chilometri dalla nostra posizione.

Si compone di due unità principali, una per l'interno (il "cervello" dell'intero sistema) e una per l'esterno. In aggiunta, è possibile acquistare più unità interne da collocare in diverse stanze e accessori per l'esterno come il pluviometro (per misurare le precipitazioni) e l'anemometro (per rilevare i parametri relativi al vento).

Il modulo per interni va ovviamente posizionato nella stanza che più si desidera monitorare e, una volta connesso al WiFi trasmetterà tutti i dati all'app, o come nel nostro caso all'interfaccia di Home Assistant, pronti per essere consultati.

3.3.1 Strumenti di misura

I sensori smart collegati all'hub di automazione Home Assistant utilizzati all'interno della test room sono:



Figura 20: Shelly plus 1PM



Figura 21: Shelly Humidity & Temperature



Figura 22: Aranet 4 Home



Figura 23: Centralina climatica Netatmo

Di seguito la Tabella 3 con i dispositivi e le relative caratteristiche tecniche.

Sensore	Unità di misura	Range operativo	Errore
Shelly H&T	°C	-40° a 60°C	±1°C
	% RH	0% a circa 100%	±5%
Aranet 4	ppm	0 a 9999	±30 ppm
	°C	0° a 50°C	0,3°C
	% RH	0% a 100%	±3%
Netatmo	ppm	0 a 5000	± 20 ppm
	°C	0° a 50°C	±0,21°C from 0° to 50 °C
	% RH	1% a 90%	±2%

Tabella 3: Caratteristiche sensori smart

3.4 Metodo Indoor Air Quality

L'IAQ non è esclusivamente da fonti esterne ma è anche influenzata dalle dall'interazione occupante-edificio [17].

Tra le sostanze che possono influenzare l'IAQ ci sono i VOC. Appartengono a questa classe numerosi composti chimici quali idrocarburi alifatici, aromatici, aldeidi, terpeni, alcoli, esteri e chetoni. Sono sostanze molto diffuse, si ritiene che un individuo possa essere esposto a 50-300 sostanze contemporaneamente presenti nell'aria di un singolo ambiente. Queste che sono prodotte da varie sorgenti di inquinamento: cosmetici, materiali di pulizia, colle e vernici, lavanderie, fumo di sigaretta ed anche strumenti di lavoro. Oltre a queste sorgenti, molto spesso questi composti sono contenuti anche in materiali da costruzioni e negli arredi che sono realizzati con prodotti che rilasciano VOC. Purtroppo, dal punto di vista legislativo, è una categoria molto complessa e poco legiferata.

La WHO ha emanato nel corso degli anni diverse linee guida sui limiti di sostanze inquinanti che non bisognerebbe superare negli ambienti dove sono presenti occupanti. Queste linee guida sono divise per ambito di applicazione, quella relativa alle scuole è stata prodotta nell'anno 2005. Dal titolo "Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrofen, dioxide and sulfur dioxide"[18], suggerisce i limiti sia a breve (24h) che a lunga esposizione (anno), di PM 2,5 e di PM 10 riportate in Tabella 4.

	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Esposizione annuale	10	20
Esposizione giornaliera	25	50

Tabella 4: Limiti di esposizione alle sostanze inquinanti

Sempre nella stessa linea guida, vengono suggeriti i limiti di concentrazione da rispettare anche per Ozono (O₃), Biossido di azoto (NO₂) e Biossido di zolfo (SO₂):

- Per il primo dei tre, il limite suggerito è di 100 µg/m³ in una media di 8 ore;
- Per il biossido di azoto invece vengono suggerite anche qui la limitazione a breve esposizione e quella a lunga esposizione che sono rispettivamente di 200 µg/m³ in un'ora e di 40 µg/m³ in un anno.
- Per l'ultimo dei tre, l'SO₂, vengono suggeriti come limiti 500 µg/m³ in una media di 10 minuti o di 20 µg/m³ in 24 ore.

Per quanto riguarda i VOC all'interno degli ambienti, sono poche le normative da prendere a riferimento.

La UNI CEN/TR 16798-2:2020 ad esempio distingue due classi di ambiente a seconda dei materiali che possono essere basso emissivi o molto basso emissivi (Tabella 5):

	Materiali basso emissivi per edifici poco inquinati	Materiali molto basso emissivi per edifici molto poco inquinati
VOC totali	< 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	< 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabella 5: Classi di ambienti dei materiali

Questa normativa si rifà ad un'altra normativa, la EN 16516: è considerabile come norma di riferimento per la determinazione delle emissioni di sostanze pericolose, principalmente della categoria dei VOC, causate da prodotti da costruzione in ambiente interno.

L'esecuzione delle prove (Figura 35) per il confronto dei controsoffitti, tra quelli di tipologia classica e quelli innovativi, verrà svolta in questo modo: fissata la temperatura dell'ambiente intorno ai 23°C, si va ad immettere la sostanza inquinante all'interno dell'ambiente, si vedrà poi come avviene il decadimento sia con l'utilizzo di controsoffitti classici (Figura 24) che con controsoffitti innovativi (Figura 25).



Figura 24: Controsoffitto con Pannelli classici

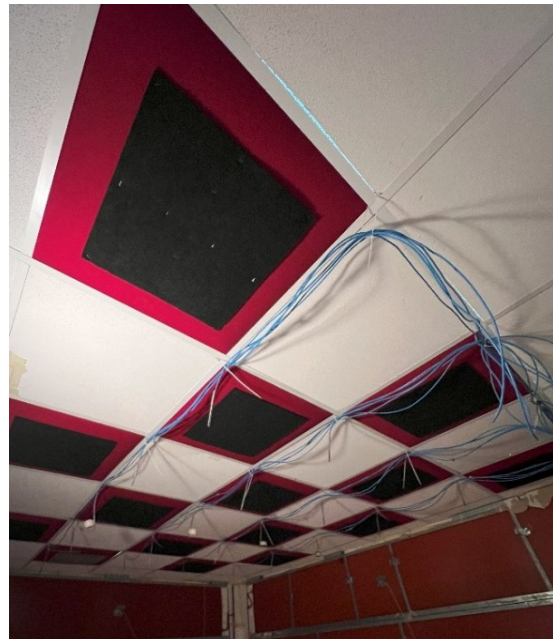


Figura 25: Controsoffitto con Pannelli Innovativi

Per andare ad eseguire le prove nella test room, come inquinante è stato utilizzato il Metiletilchetone (sigla MEK, Figura 26). Conosciuto anche come Butanone, si tratta di una sostanza avente formula $\text{CH}_3\text{COC}_2\text{H}_5$, peso molecolare di 72,11 g/mol e densità di 0,805 g/cm³.

A temperatura ambiente si presenta come un liquido incolore con un odore simile ad un solvente: infatti, viene spesso usato come solvente in molte lavorazioni, ad esempio del legno, oppure per la pulizia di strumenti e parti meccaniche.

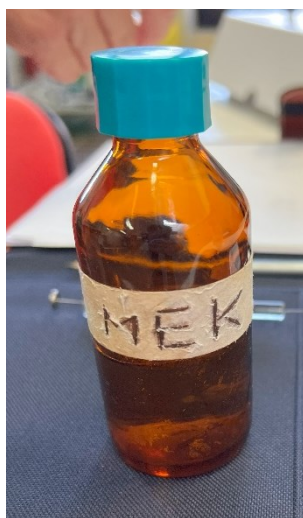


Figura 26: Inquinante utilizzato nelle prove (Metiletilchetone)

Il MEK è un composto organico volatile (COV o VOC, a seconda se si usa l'acronimo italiano o inglese).

I composti organici volatili sono molecole che nel loro insieme hanno comportamenti fisici e chimici differenti, ma sono accomunati dal fatto che presentano un'elevata volatilità. In termini numerici, significa che alla temperatura di 293,15 K (20 °C), abbiamo una pressione di vapore di 0,01 kPa o superiore. Numerosi inquinanti dell'aria appartengono a questa classe di molecole organiche.

Il MEK è stato scelto come modello di tutta questa classe di inquinanti, per due motivi:

- Il primo è legato alla sua inferiore tossicità rispetto ad altri COV pur presenti nei nostri ambienti di vita. Ad esempio, per il NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), il valore limite di esposizione prolungata nel tempo del MEK è doppio di quello del Toluene. Infatti, il TLV - TWA (Threshold Limit Value - Time Weighted Average) del MEK è 200 ppm (590 mg/m³) contro i 100 ppm (375 mg/m³) del Toluene e solo 0.016 ppm (0.020 mg/m³) per la formaldeide.

- In secondo luogo, il MEK è adottato come tracciante di odori nella normativa tecnica, IEC 61591:1997+A1:2005[19], che valuta l'efficienza depurante delle cappe da cucina filtranti, ossia quelle che, anziché espellere il flusso verso l'esterno, lo filtrano attraverso uno strato di carbone attivo. In assenza di altre norme per la valutazione di sistemi filtranti, questo rappresenta un utile riferimento anche se di applicazione domestica.

Lo strumento che è stato utilizzato per rilevare la quantità di VOC che nel nostro caso si tratta di Metiletilchetone è stato utilizzato un sensore prodotto da Aeroqual.

Si tratta dell'S900 (Figura 34) alla quale possono essere collegate diverse tipologie di rilevatori. Nel nostro caso si è utilizzato appositamente un rilevatore di VOC, calibrato con Isobutene e con le caratteristiche tecniche elencate in (Tabella 6).

Range	0-30 ppm
Limite minimo di rilevamento	0,01ppm
Accuratezza	< ± 0,02ppm + 10%
Risoluzione	0,01ppm

Tabella 6: Caratteristiche tecniche strumento utilizzato (Aeroqual S900)

Come quantità è stata scelta di utilizzare un solo millilitro per ogni prova. La scelta è dovuta al fatto che, essendo la stanza di circa 40 metri quadri, ci si aspetta dei valori massimi di 6,7 ppm (questo valore può variare in base alla temperatura): il numero di moli utilizzato è pari al rapporto tra il peso molecolare e la densità della sostanza utilizzata:

$$\frac{72,11}{0,805} = 0,0111 \text{ mol}$$

Questa quantità di sostanza, una volta evaporata tutta in ambiente, occuperà un certo volume pari esattamente al volume molare del gas, che, calcolato alla temperatura di 23°C, è quella attorno alla quale ci si attesta per effettuare i test nella control room. Viene così calcolato:

$$V_m = \frac{R \times T}{p} = \frac{8,314472 \times 296,15}{101,325} \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol} = 24,301 \text{ l/mol}$$

Questo volume, moltiplicato per il numero di moli utilizzate, ci fa capire il reale volume occupato nel nostro caso, pari a:

$$V= 0,272 \text{ l}$$

che, rapportato al volume della stanza di circa 40 metri cubi, ci restituisce il valore di ppm teorico:

$$\text{ppm}_{\text{max}}= 6,782$$

I valori ottenuti dipenderanno molto sia da come viene diffusa la quantità di sostanza e sia da come sono in quel momento i moti d'aria all'interno dell'ambiente. Ovviamente, ci si aspettano valori al di sotto di quelli calcolati matematicamente per diverse ragioni:

1. l'ambiente nella quale vengono immesse le sostanze in questione non è completamente stagno, sia perché il sensore ha un certo errore
2. la misurazione dipende molto dai flussi d'aria e dall'omogeneità di questi all'interno della stanza.
3. le modalità di immissione e diffusione dell'inquinante all'interno dell'ambiente.

Per l'immissione sono state utilizzate due modalità,

1. la prima modalità è tramite l'utilizzo di uno spruzzatore classico (Figura 28), all'interno del quale veniva inserito 1 ml di Metiletilchetone diluito in 100 ml di acqua e poi diffuso all'interno dell'ambiente nel più breve tempo possibile.
2. La seconda modalità invece è stata effettuata versando un millilitro di MEK direttamente su un vetrino da orologio (Figura 29) posto davanti alla sorgente di ventilazione lasciandolo evaporare. Questa prova è stata effettuata disponendo il sensore in tre posizioni della stanza come riportato in Figura 27.

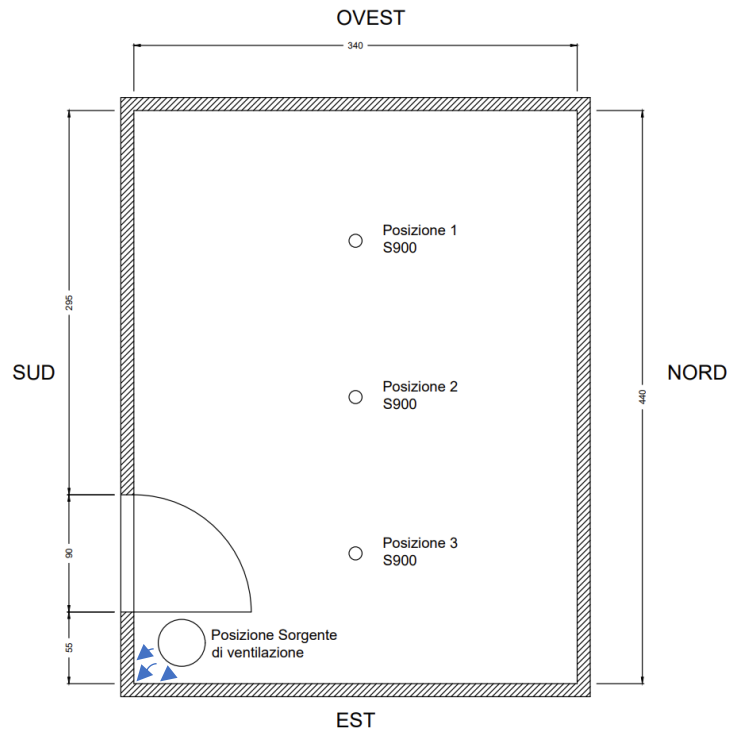


Figura 27: Posizioni sensore S900



Figura 28: Foto della prima modalità di immissione di inquinante utilizzata (spruzzatore)



Figura 29: Foto della prima modalità di immissione di inquinante utilizzata (vetrino da orologio)

Una volta immesso l'inquinante all'interno dell'ambiente avremo un picco iniziale per poi avere un decadimento della quantità di inquinante. Ciò che si andrà a valutare nella comparazione delle due tipologie di pannelli è sia il decadimento (più veloce sarà e maggiore sarà l'efficacia dei pannelli di assorbire il composto organico) sia il valore massimo

registrato, questo (minore il valore, maggiore sarà l'assorbimento di sostanza da parte dei pannelli).

In entrambi i casi si è ritenuto necessario l'utilizzo di un sistema di diffusione e movimentazione d'aria all'interno dell'ambiente affinché si riuscisse ad ottenere un'omogeneità di gas.

Sono stati presi in considerazione due dispositivi:

1. il primo è la ventola di un sistema a pompa di calore portatile (VPdC), e
2. il secondo invece è uno scaldabagno con la funzione di sola ventilazione (VS), senza accensione di resistenze termiche.

Per l'esecuzione di questa prova di comparazione entrambi i dispositivi sono stati posti ad un'altezza di 45 cm, entrambi posizionati vicino la parete Sud e direzionati verso la parete Ovest come riportato nella Figura 30.

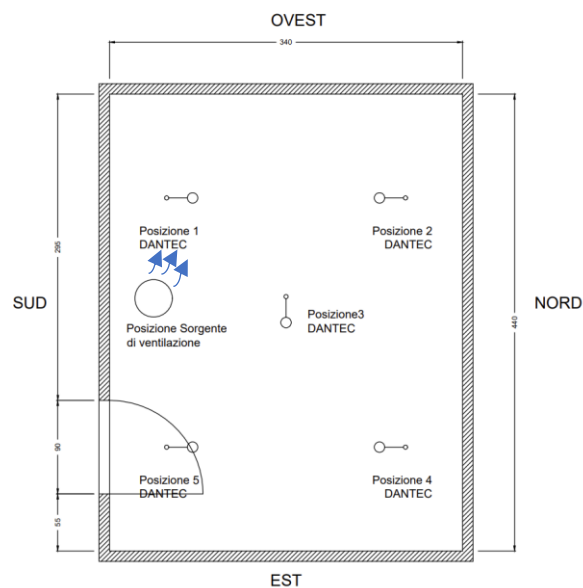


Figura 30: Posizionamento c della sorgente di ventilazione

Il secondo posizionamento riportato in Figura 31 invece è stato utilizzato solamente con VS, ed è stato quello che poi è stato anche impiegato per le prove effettuate con il MEK.

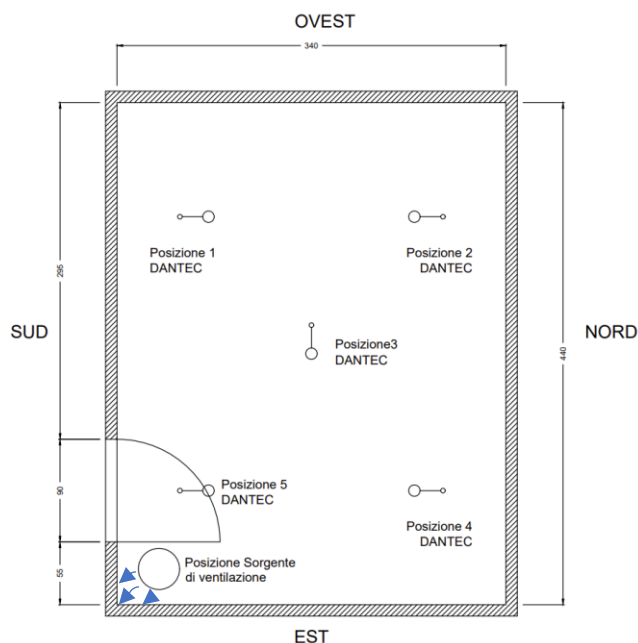


Figura 31: Posizionamento a della sorgente di ventilazione

Le prove sono state effettuate per 10 minuti in ciascuna posizione. Si sono poi esclusi i minuti di assestamento dell'ambiente, considerando quindi solamente 5 minuti per ogni prova. Queste sono state ripetute con entrambi i sistemi di ventilazione.

Per la rilevazione delle velocità dell'aria sono stati utilizzati tre anemometri posti su un'asta a diverse altezze (Figura 32). La prima si trovava a 0,1 m dal suolo, la seconda a 0,6 m e la terza a 1,1 m (Figura 33). Questi sensori sono in grado di rilevare la velocità dell'aria in un range che va da 0,05 a 10 m/s, con un'accuratezza che varia a seconda delle velocità dell'aria e sono esposte in Tabella 7:

Velocità	Accuratezza
0-1 m/s	$\pm 2\%$ o $\pm 0,02$ m/s
1-5 m/s	$\pm 5\%$
5-10 m/s	$\pm 5\%$

Tabella 7: Range velocità dell'aria con accuratezza

Questo sensore è stato posizionato in cinque zone della stanza per riuscire ad avere una distribuzione tridimensionale delle velocità dell'aria all'interno dell'ambiente in modo da poter valutare il miglior sistema di movimentazione dell'aria che, per simulare l'ambiente scolastico, deve rispettare alcune caratteristiche, prima fra tutte è la velocità. Secondo la UNI 10339:1995 [20], le velocità dell'aria all'intero degli ambienti scolastici devono rispettare i limiti riportati nella (Tabella 8):

Edifici adibiti ad attività scolastiche	Velocità dell'aria in riscaldamento	Velocità dell'aria in raffrescamento
-scuole materne ed elementari	$\leq 0,1$ m/s	$\leq 0,1$ m/s
-aule di istituti medie e superiori	da 0,05 a 0,15 m/s	da 0,05 a 0,20 m/s
-altri locali	da 0,05 a 0,15 m/s	da 0,05 a 0,20 m/s

Tabella 8: Limiti di velocità dell'aria all'interno degli ambienti scolastici

3.4.1 Strumenti di misura

La strumentazione utilizzata per effettuare le prove nella test room relative alle velocità e alla qualità dell'aria è la seguente:



Figura 32: Dantec Dinamycs 1



Figura 33: Dantec Dinamycs 2



Figura 34: Aeroqual S900



Figura 35: Preparazione della prova

4. Risultati

In questa sezione verranno riportati i risultati relativi alle prove effettuate e descritte nelle sezioni precedenti. Le prime prove sono state quelle relative alla rilevazione della presenza di una persona all'interno della test room. La persona è stata simulata con una lampada da 100 W che è stata accesa e spenta ad intervalli di tempo via via minori, in modo da arrivare al tempo minimo di rilevamento. La lampada è stata posizionata in varie zone della stanza per valutare se e come le diverse configurazioni potessero influire sulla griglia di sensori installati.

L'altra tipologia di prove è servita a valutare la capacità di una tipologia di controsoffitti innovativi rispetto a controsoffitti comuni nell'assorbire VOC, presenti all'interno dell'ambiente. Per simulare i VOC, è stata utilizzata una sostanza non tossica chiamata Metiletilchetone o Butanone. È stata immessa con due modalità:

- Diluendo l'inquinante con 100 ml di acqua e tramite uno spruzzatore è stata immessa in ambiente;
- Posizionando la sostanza su un vetrino da orologio ed attendere che questa evaporasse.

4.1 Risultati prove di rilevazione della presenza

Nella prima immagine viene mostrata la distribuzione di temperatura all'interno della test room in condizioni normali, con il raffrescamento a pannelli radianti in funzione. Si nota che si viene a creare un gradiente termico all'interno della stanza. Questo gradiente è principalmente attribuibile a due fattori principali: in primo luogo, i pannelli radianti che contribuiscono al raffreddamento sono posizionati sulle due delle quattro pareti verticali della stanza, coincidenti con le pareti più fredde nella pianta della stanza; in secondo luogo, la parete che corrisponde all'asse Y nella Figura 36 è dotata di una porta d'accesso alla stanza, la quale, purtroppo, presenta un isolamento termico non ottimale in quella zona.

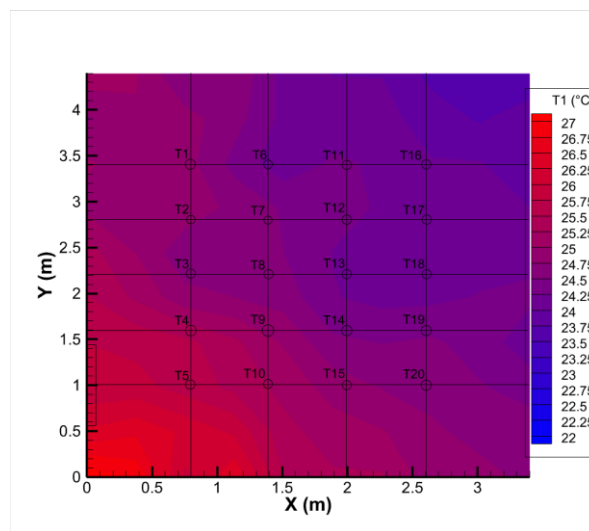


Figura 36: Gradiente termico nella test room

Per chiarezza e facilità di visualizzazione, in questa sezione, sono state riportate solamente quattro delle venti termocoppie, una per ciascuna zona. Le zone nella quale è stata divisa la test room sono state individuate con quattro colori come viene riportato in Figura 38. I grafici con ciascuna delle venti termocoppie sono stati riportati in Appendice 1 per quanto riguarda il primo set di prove e nell' Appendice 2 per quanto riguarda il secondo set di prove.

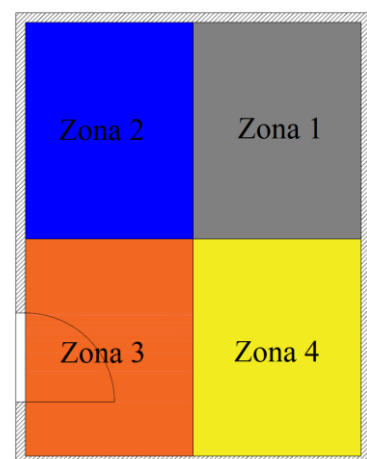


Figura 37: Zone della test room

4.1.1 Prova 1-5-10 minuti

L'obiettivo delle prove condotte è ottenere un aumento delle temperature all'interno della test room nel momento in cui la lampada viene accesa. Questo incremento dovrebbe persistere fino a quando la lampada viene spenta, dopodiché la temperatura registrata dalla termocoppia dovrebbe gradualmente diminuire o stabilizzarsi intorno al valore iniziale. Il periodo di accensione e spegnimento della lampada è delineato dal riquadro di colore rosa con il bordo tratteggiato presente in tutti i grafici che rappresentano l'andamento delle temperature nel tempo.

Nel Grafico 1 sono riportati gli andamenti delle temperature rilevati nella prima prova, ovvero quella nel quale è stata accesa la lampada nella Zona 1 prima per un minuto, poi per cinque minuti e poi per dieci minuti. Queste accensioni erano separate da intervalli di tempo utili per l'assestamento delle temperature, solitamente intorno ai 10 minuti. È possibile osservare che la termocoppia numero 17, identificata dal colore grigio nel grafico, presenta un comportamento conforme agli obiettivi prestabiliti. Si registra un aumento delle temperature al momento dell'accensione della lampada e una successiva diminuzione al momento dello spegnimento della stessa. Questo andamento è osservabile sia per la termocoppia numero 7 che per la termocoppia numero 17, posizionate in due diverse zone della stanza. Questa conformità è plausibile poiché la lampada è situata in uno spazio di dimensioni ridotte, e la termocoppia numero 7 si trova in prossimità della fonte di calore.

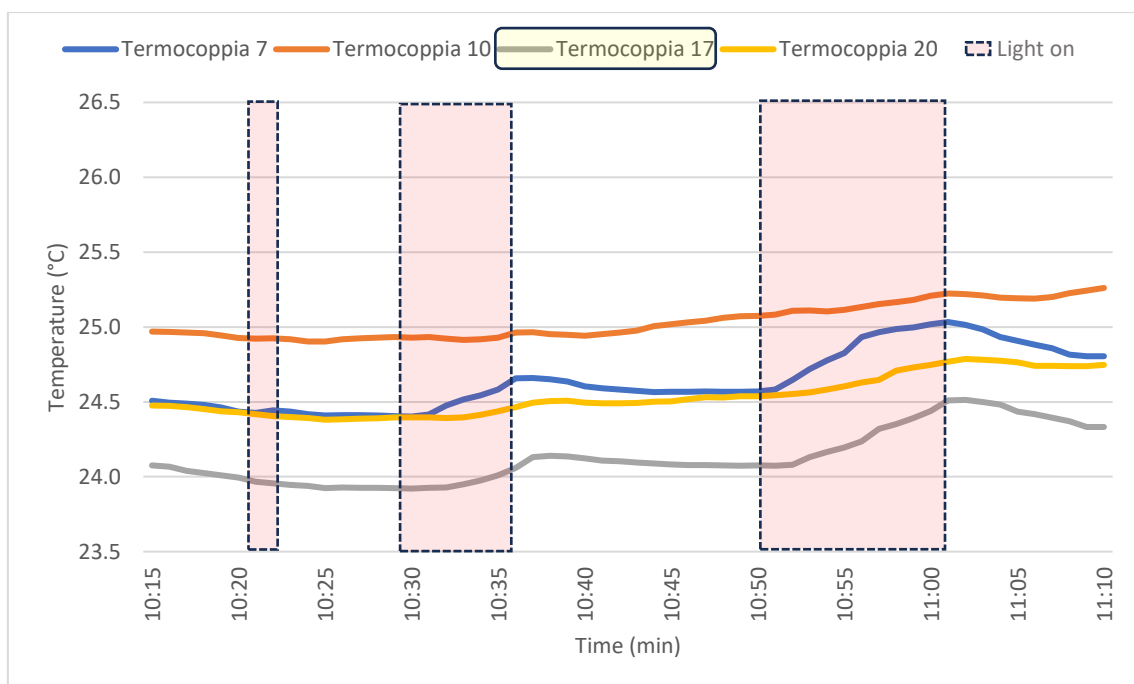


Grafico 1: Accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 1

Per evidenziare con maggiore chiarezza quale termocoppia rilevi in modo più pronunciato la presenza della lampada e, di conseguenza, la presenza di una persona, si è optato per un approccio di visualizzazione alternativo rispetto all'andamento temporale delle temperature. In particolare, è stato calcolato il valore medio delle temperature e tale valore è stato sottratto da ciascuna lettura istantanea. Questo approccio consente di valutare con maggior precisione l'escursione termica registrata da ciascuna termocoppia.

Questo processo è stato successivamente rappresentato tramite un grafico noto come "box-plot" o diagramma a scatola e baffi. Questo tipo di rappresentazione grafica è utilizzato per descrivere la distribuzione dei dati di un campione, evidenziando gli indici di dispersione e di posizione. Nel grafico a scatola e baffi, un rettangolo è delimitato dal primo quartile e dal terzo quartile, con una linea mediana al suo interno. I "baffi" corrispondono ai valori minimi e massimi del campione.

Osservando le distribuzioni ottenute per il periodo di accensione di dieci minuti Grafico 2: Box Plot accensione lampada 10 minuti, zona 1, con 3 minuti precedenti e successivi all'accensione, è evidente che la termocoppia numero 17 presenta una deviazione standard superiore rispetto alle altre tre termocoppie. Questo indica che la termocoppia numero 17 ha registrato variazioni di temperatura significativamente più ampie rispetto alle altre, il che rispecchia l'obiettivo desiderato

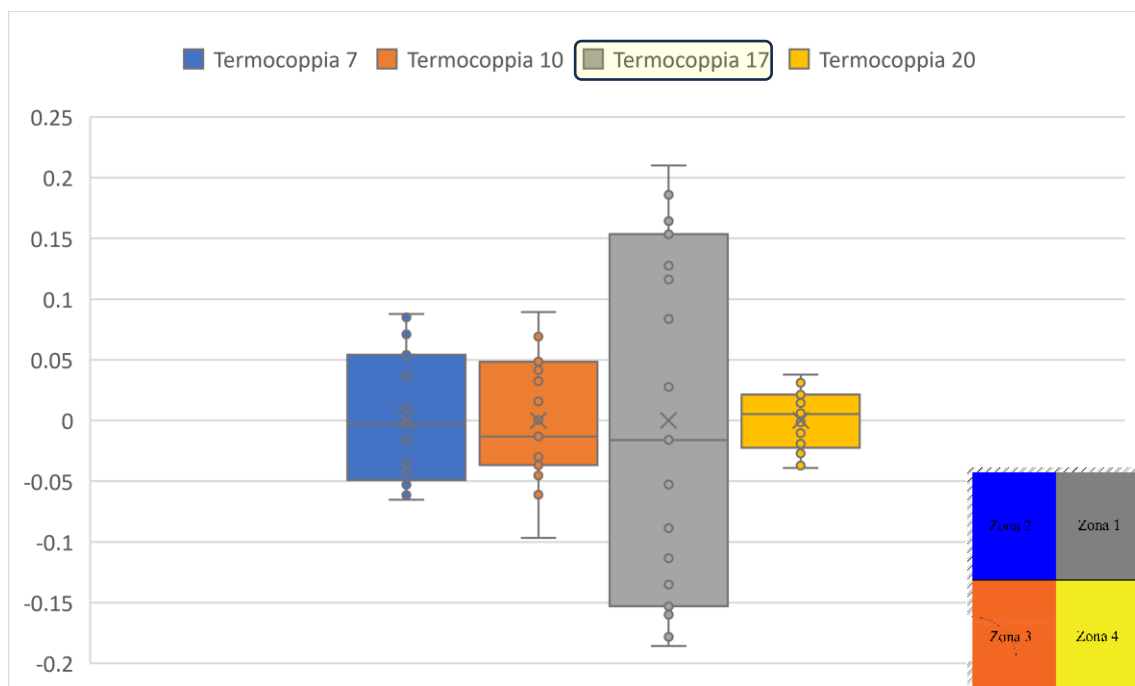


Grafico 2: Box Plot accensione lampada 10 minuti, zona 1

Successivamente sono riportate sei immagini delle dodici che verranno inserite in Appendice 3. Raffigurano in pianta la test room e i ΔT di temperatura tra la temperatura minima registrata da ciascuna termocoppia nell'intervallo preso in considerazione e la temperatura di ciascun minuto. Sono indicati i numeri delle termocoppie e la posizione della lampada.

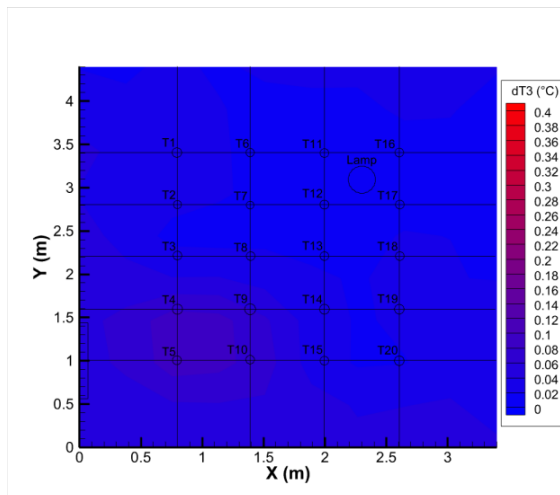


Figura 38: Prova 1-5-10, zona 1, min 3

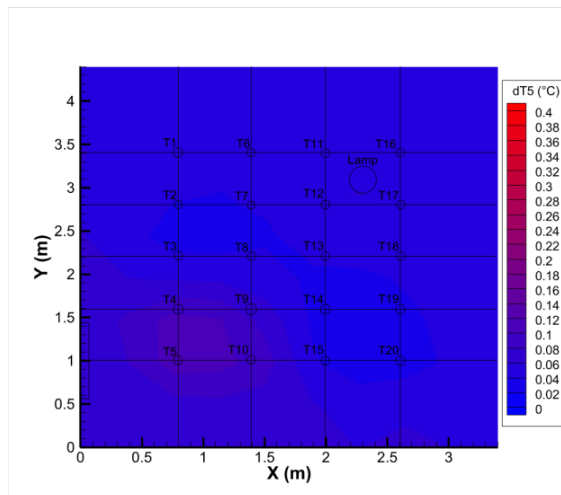


Figura 39: Prova 1-5-10, zona 1, min 5

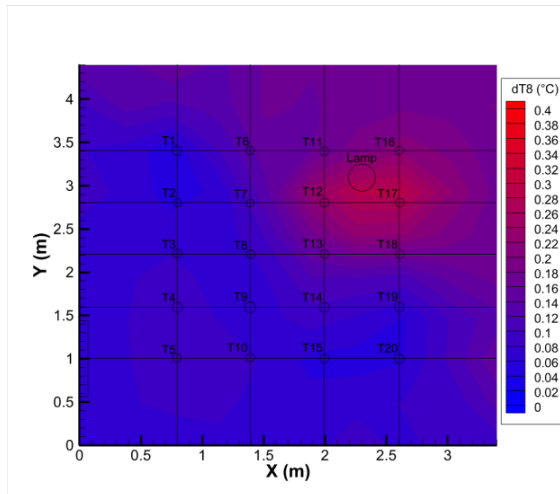


Figura 40: Prova 1-5-10, zona 1, min 8

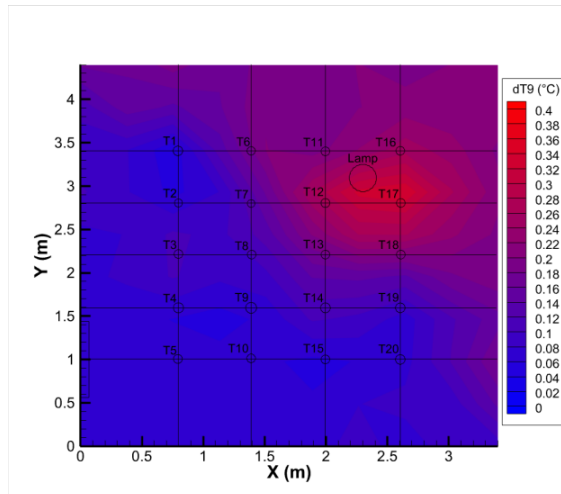


Figura 41: Prova 1-5-10, zona 1, min 9

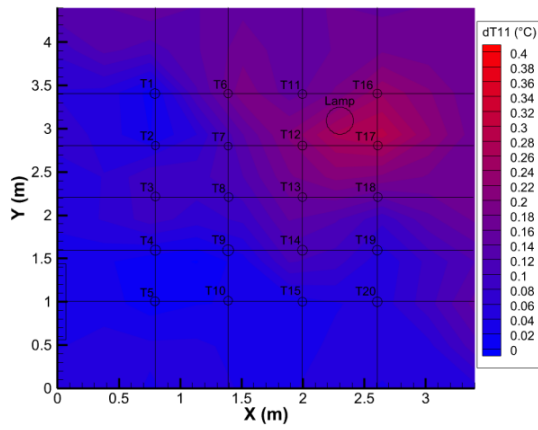


Figura 42: Prova 1-5-10, zona 1, min 11

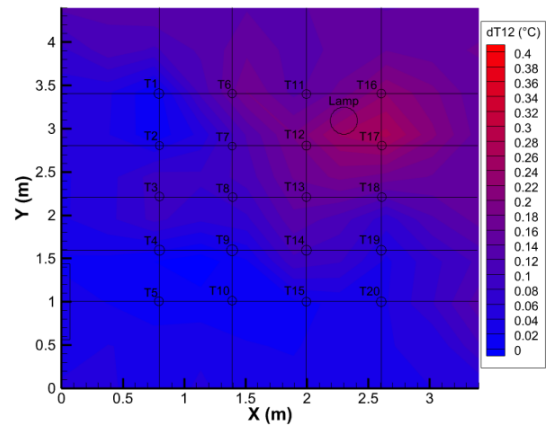


Figura 43: Prova 1-5-10, zona 1, min 12

4.1.2 Prova 1-3-5 minuti

Visti i risultati positivi, la prova successiva è stata svolta con periodi da un minuto, tre minuti e cinque minuti. Questo perché si è notato nella precedente prova che già cinque minuti sembrerebbero sufficienti per rilevare la presenza di una persona; quindi, si è voluto replicare la prova diminuendo i tempi di accensione per andare a vedere se nel periodo di accensione più breve si notava ancora questa tendenza. Questa volta la prova rappresentata è stata effettuata nella Zona 2, quella in blu nella Figura 38: Zone della test room.

Di seguito gli andamenti delle temperature di quattro termocoppie, una per ciascuna zona. Anche nel Grafico 3: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 2 si possono notare aumenti e diminuzioni apprezzabili in due delle quattro termocoppie.

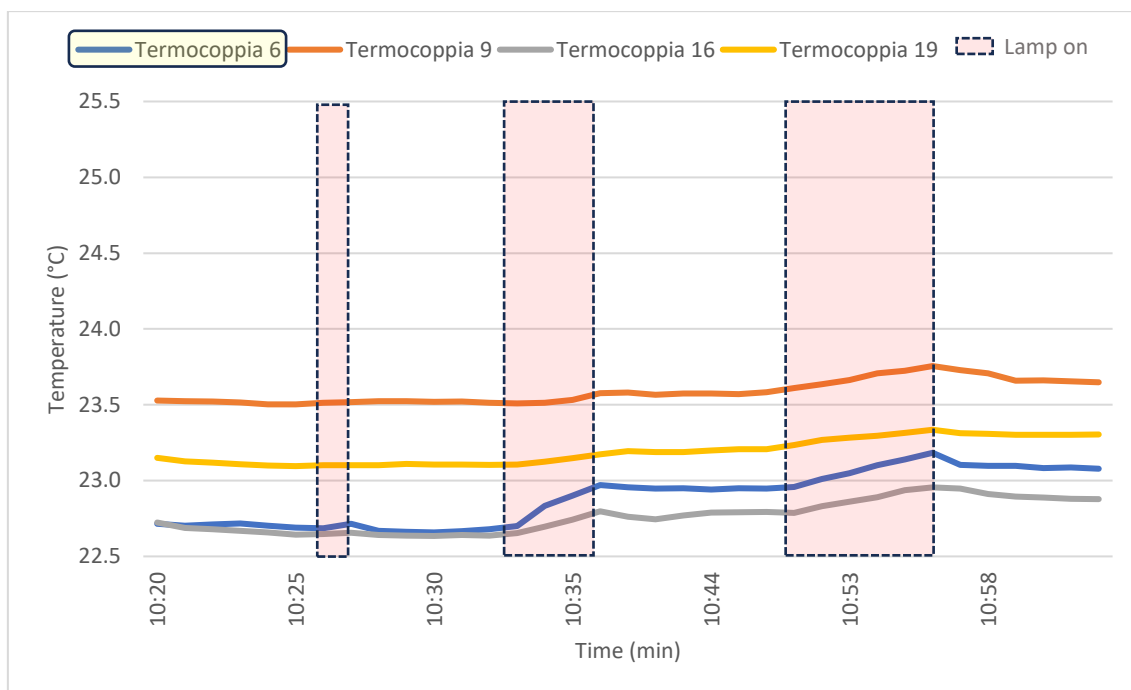


Grafico 3: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 2

Andando a visualizzare la distribuzione delle temperature come fatto in precedenza, nel Grafico 4 si nota una deviazione standard maggiore per la termocoppia numero 6 e quindi anche in questo caso possiamo dire che la termocoppia ha “rilevato” la presenza di una persona.

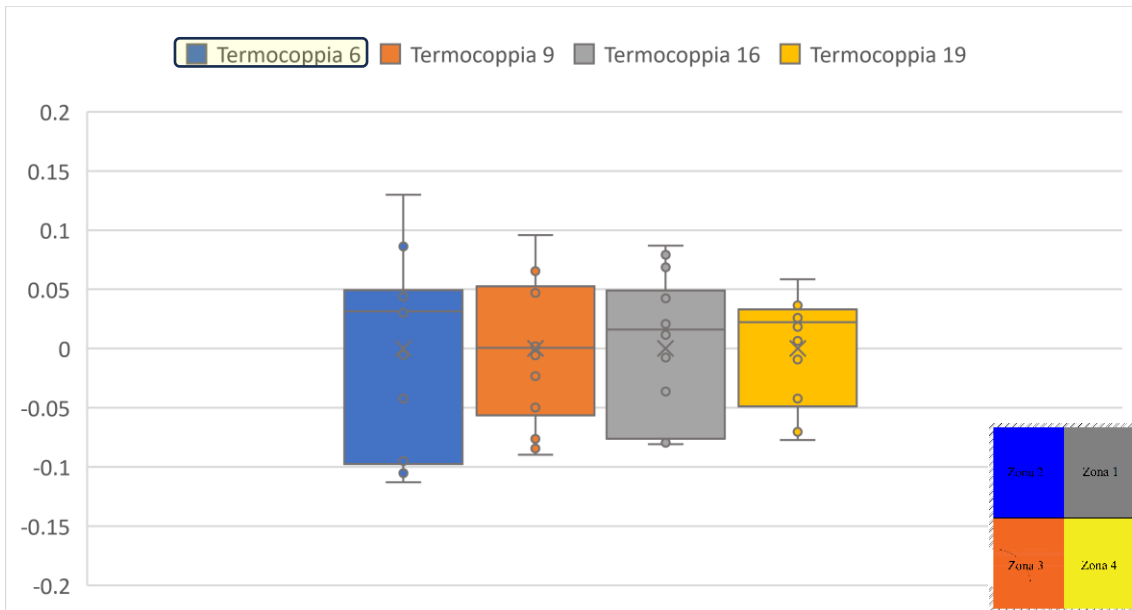


Grafico 4: Box Plot accensione lampada 5 minuti, zona 2

Meno apprezzabile è il risultato della prova eseguita con la durata di accensione della lampada di tre minuti.

Nel Grafico 5 è rappresentata la distribuzione delle temperature con un diagramma “scatola e baffi” e si nota che in questo caso è difficile distinguere sotto quale termocoppia era stata posizionata la lampada.

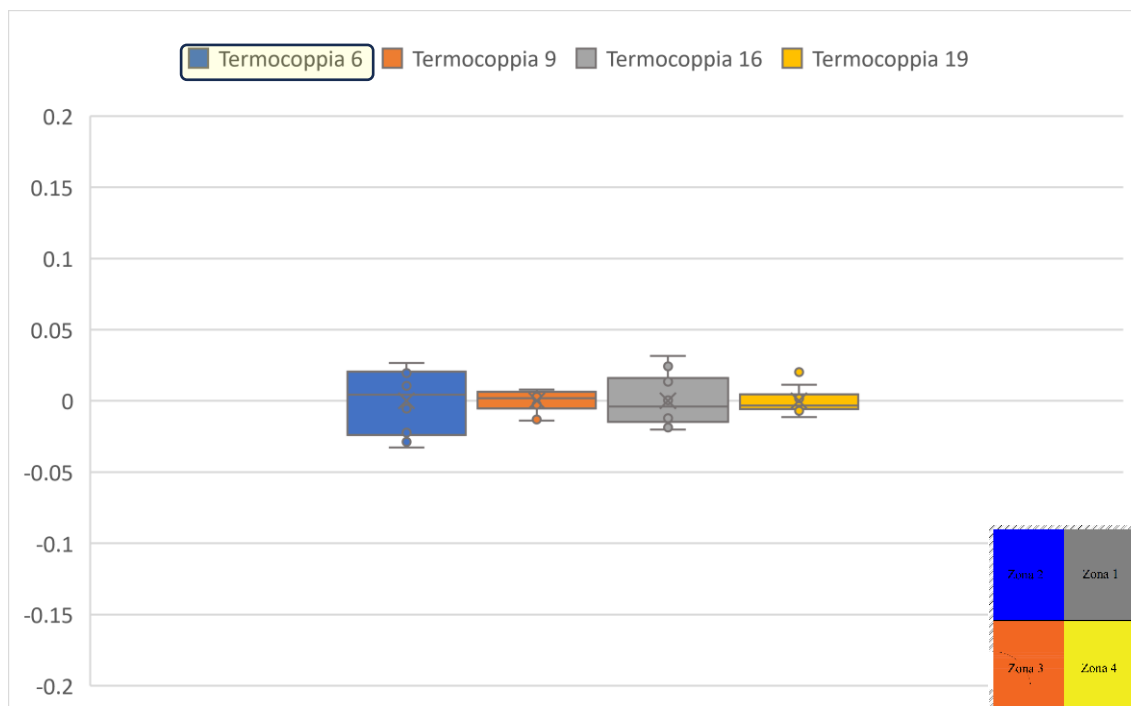


Grafico 5: Box Plot accensione lampada 3 minuti, zona 2

Le immagini di seguito riportate sono relative alla prova 1-3-5 minuti effettuata con la lampada posizionata nella zona 2. Più precisamente sono immagini realizzate andando a considerare cinque minuti come tempo di accensione della lampada. Le immagini minuto per minuto sono state riportate in Appendice 3, qui ne verranno riportate solamente 6 utili a comprendere il risultato ottenuto.

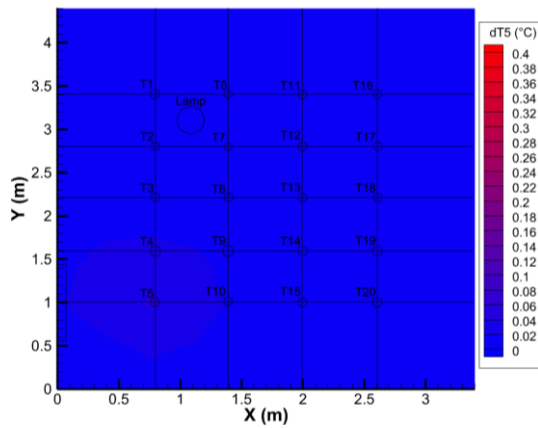


Figura 44: Prova 1-3-5, zona 2, min 5

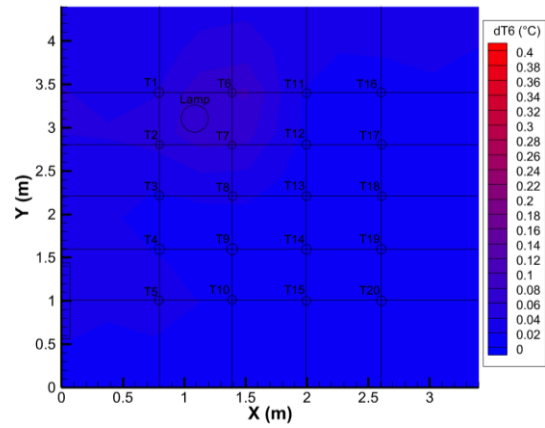


Figura 45: Prova 1-3-5, zona 2, min 6

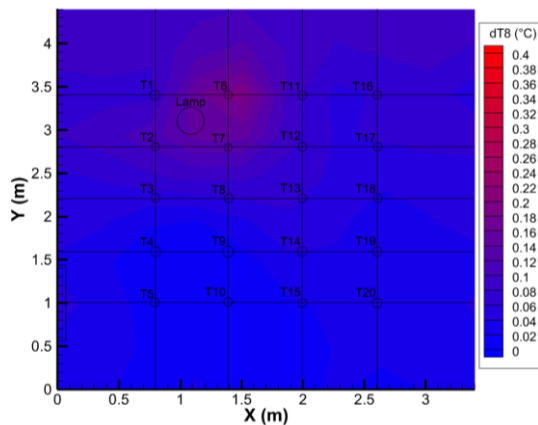


Figura 46: Prova 1-3-5, zona 2, min 8

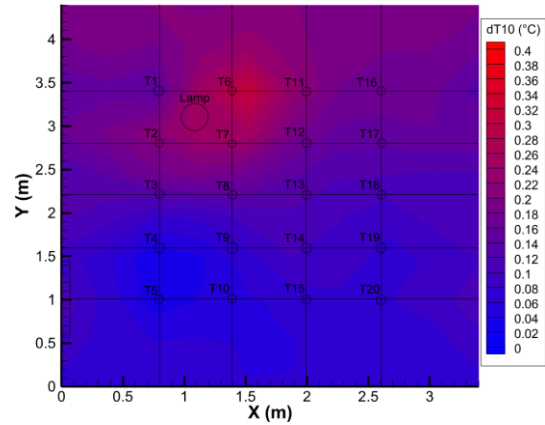


Figura 47: Prova 1-3-5, zona 2, min 10

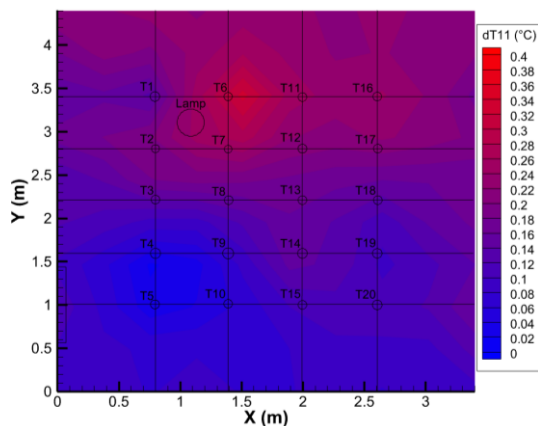


Figura 48: Prova 1-3-5, zona 2, min 11

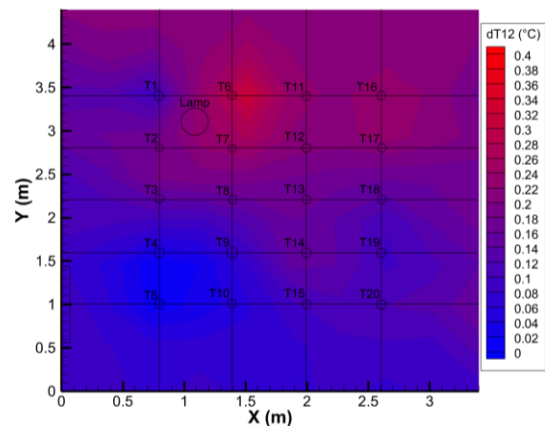


Figura 49: Prova 1-3-5, zona 2, min 12

4.2 Risultati IAQ

Sono stati riportati i risultati relativi alle prove effettuate per la valutazione del sistema di movimentazione dell'aria all'interno della test room. In secondo luogo, sono riportati i risultati delle prove effettuate per la valutazione delle due tipologie di pannelli relativamente alla capacità di assorbire VOC.

4.2.1 Velocità dell'aria

È utile ricordare in questa sezione che sono stati presi in considerazione due dispositivi la ventola di un sistema a pompa di calore portatile (VPdC), e uno scaldabagno con la funzione di sola ventilazione (VS), senza accensione di resistenze termiche. Di seguito verranno distinte VSc per specificare che VS era rivolta verso il centro della stanza e VSa per specificare che VS era diretta verso l'angolo della stanza

I grafici esposti di seguito rappresentano i valori ottenuti nelle prove che sono durate cinque minuti ciascuna. Per ogni minuto vengono registrati 12 valori, andando a fare la media di questi si ottiene la media di ciascun minuto. Ogni box dei grafici seguenti quindi contiene 5 valori, ciascuno è il valor medio di ogni minuto.

Nel Grafico 6 sono riportate le distribuzioni dei valori di velocità dell'aria registrati nella prova effettuata con la VPdC posizionata al centro della test room come riportato in Figura 30. Si può osservare che c'è una stratificazione dell'aria in cui la velocità dell'aria aumenta man mano che ci si avvicina al pavimento. Tuttavia, è importante ricordare che all'interno degli ambienti scolastici, la velocità dell'aria dovrebbe essere inferiore a 0,1 m/s, un parametro che purtroppo non viene rispettato in questa situazione.

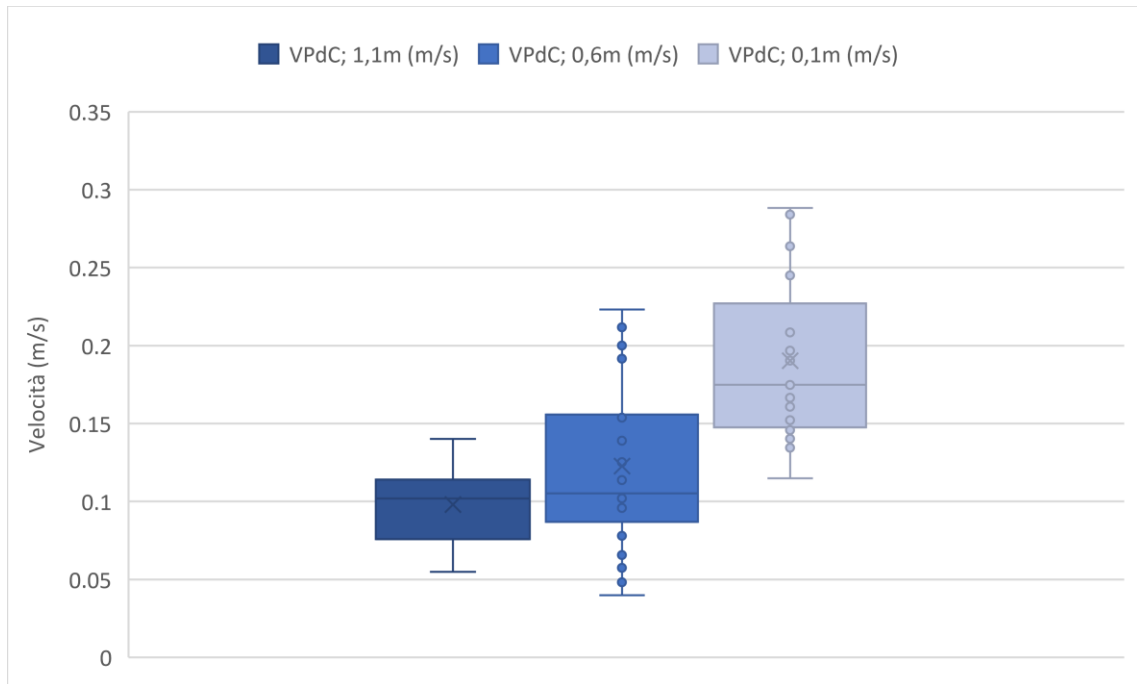


Grafico 6: Velocità dell'aria VPdC

Il Grafico 7: Velocità dell'aria VSc riporta i valori registrati nella prova effettuata con VS posizionata come in Figura 30 ovvero con VSc posizionata vicino la parete Sud e direzionati verso la parete Ovest. Si nota uno scarto quadratico medio ampio per quanto riguarda la sonda di velocità posizionata a 0,6 m di altezza dal suolo.

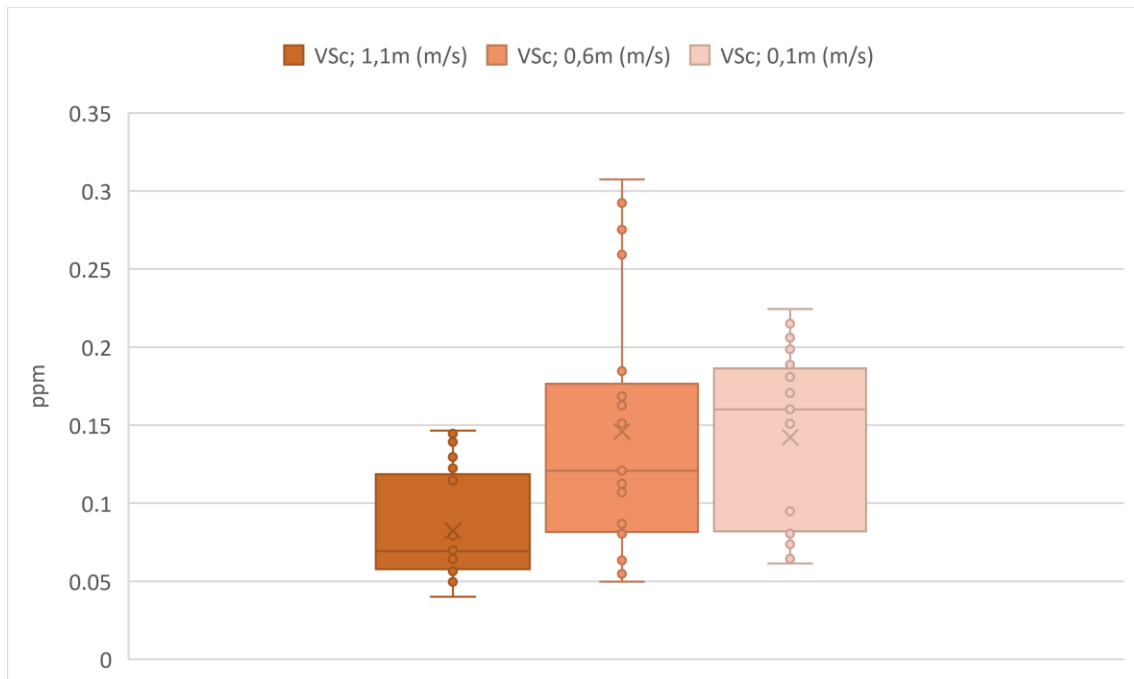


Grafico 7: Velocità dell'aria VSc

Nel Grafico 8 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportati i valori della stessa prova a cui ci si riferisce nel grafico precedente. L'unica differenza è nei valori di VSc: non sono stati considerati i valori registrati dal sensore posto a 0,6m d'altezza quando la sorgente di ventilazione era nella posizione 1 ottenendo comunque delle stratificazioni ma con velocità minori rispetto alla prova precedente.

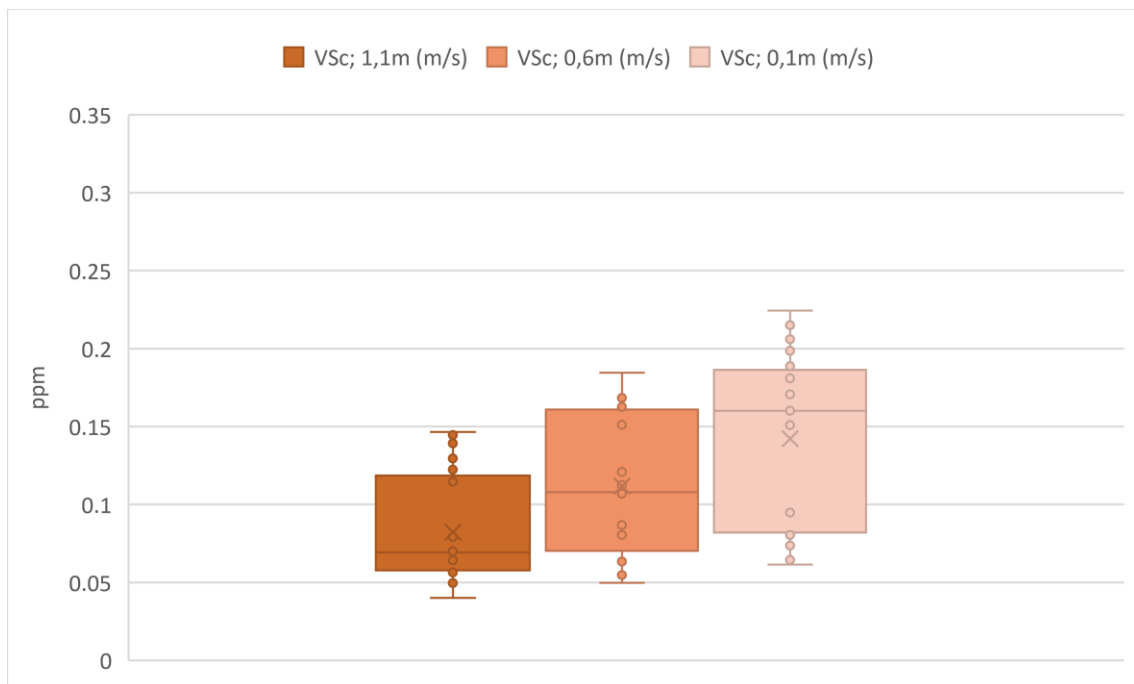


Grafico 8: Velocità dell'aria VSc

Nel Grafico 9: Velocità dell'aria VSA sono riportati i valori di velocità dell'aria registrati dai sensori posti a tre altezze differenti, ovvero di 0,1 m quella più bassa, 0,6 m quella a mezza altezza e 1,1 la sonda posta più in alto. In questo caso la VS era posizionata all'angolo della stanza come riportato Figura 31. Si notano delle velocità notevolmente inferiori e non sembrerebbe esserci stratificazione dell'aria.

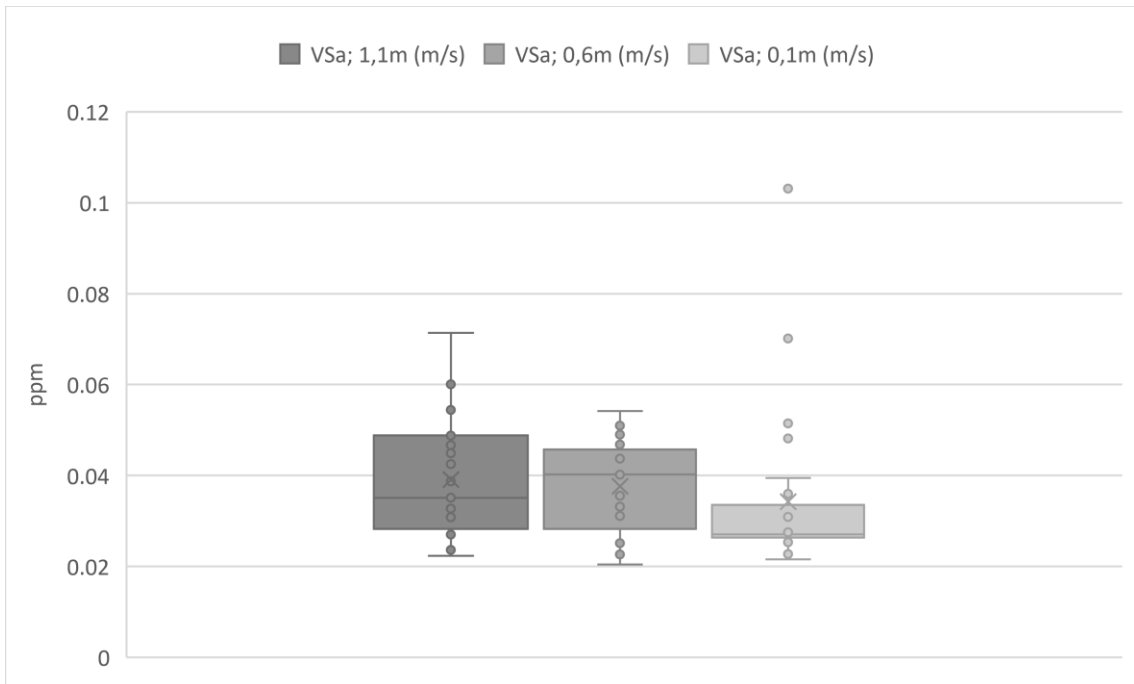


Grafico 9: Velocità dell'aria Vsa

Di seguito sono state riportate le immagini che rappresentano una mappatura tridimensionale delle velocità dell'aria divise in tre gruppi:

1) Gruppo 1: immagini è relative a VPdC

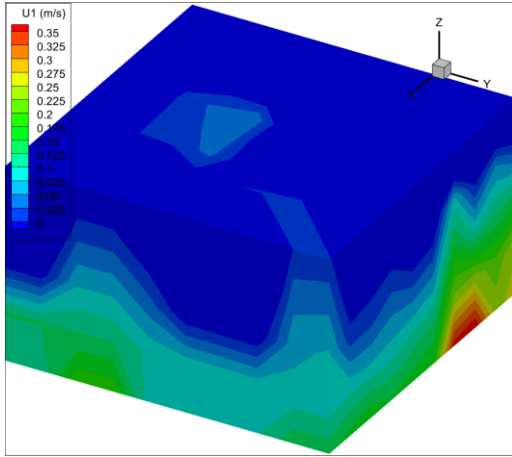


Figura 50: VPdC min 1

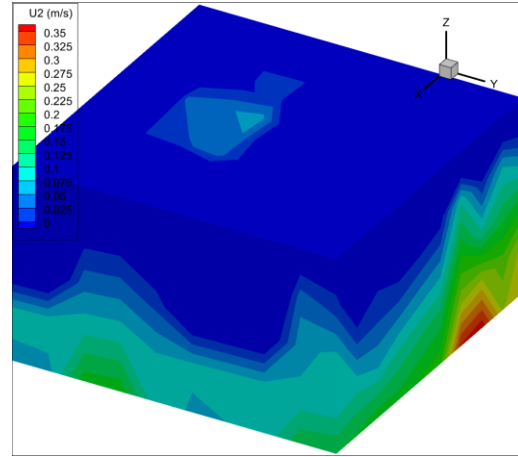


Figura 51: VPdC min 2

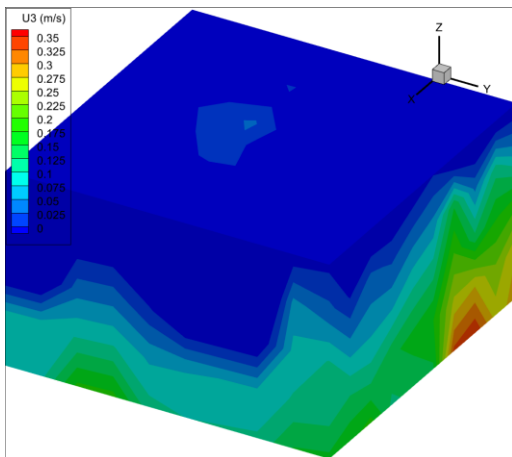


Figura 52: VPdC min 3

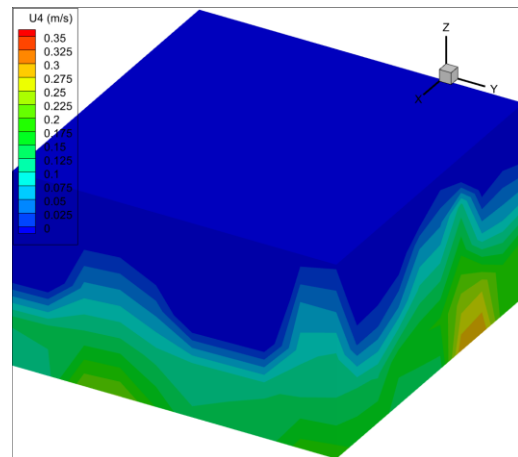


Figura 53: VPdC min 4

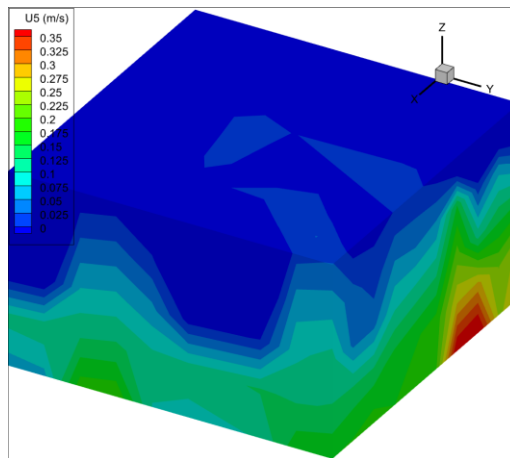


Figura 54: VPdC min 5

2) Gruppo 2: immagini relative a VSc

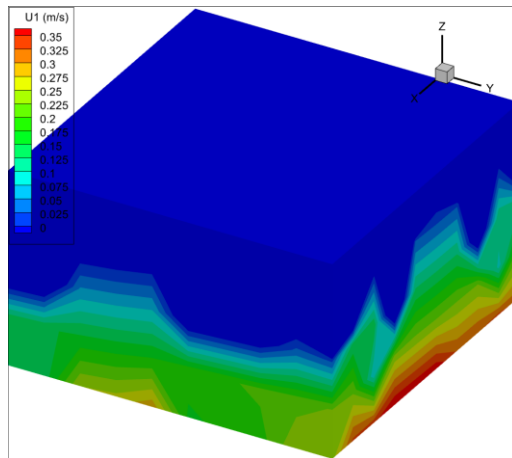


Figura 55: VSc min 1

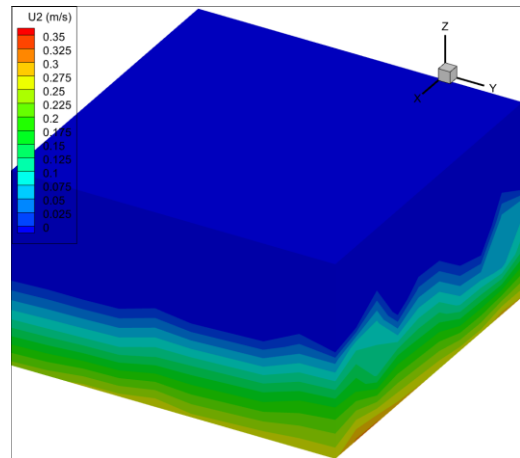


Figura 56: VSc min 2

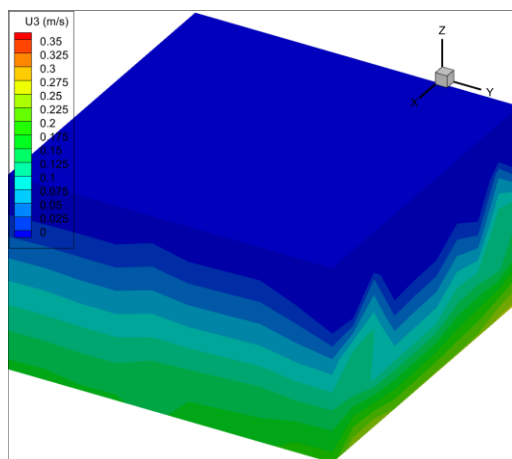


Figura 57: VSc min 3

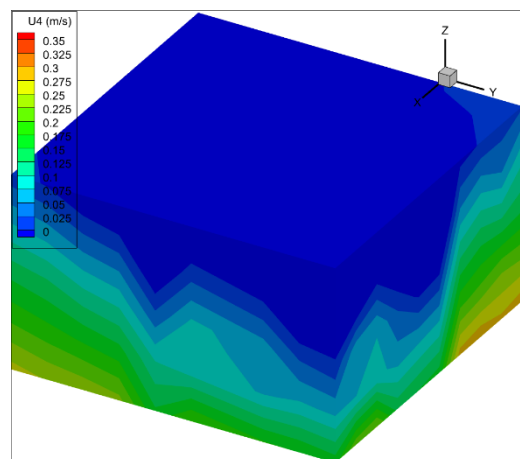


Figura 58: VSc min 4

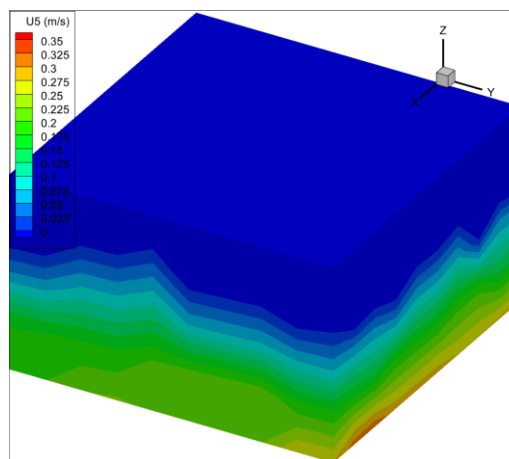


Figura 59: VSc min 5

3) Gruppo 3: immagini relative a VSa

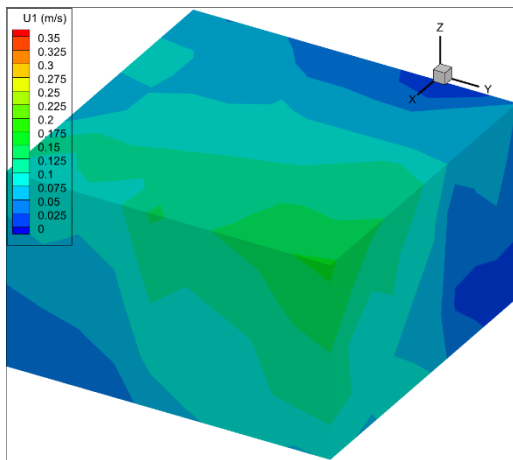


Figura 60: VSa min 1

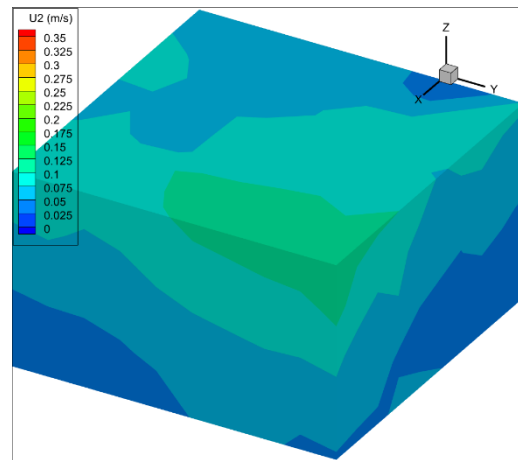


Figura 61: VSa min 2

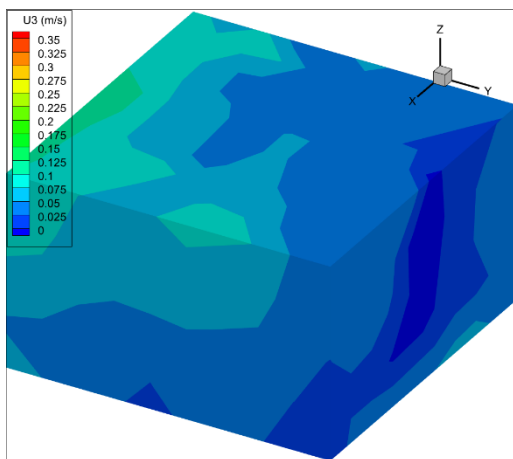


Figura 62: VSa min 3

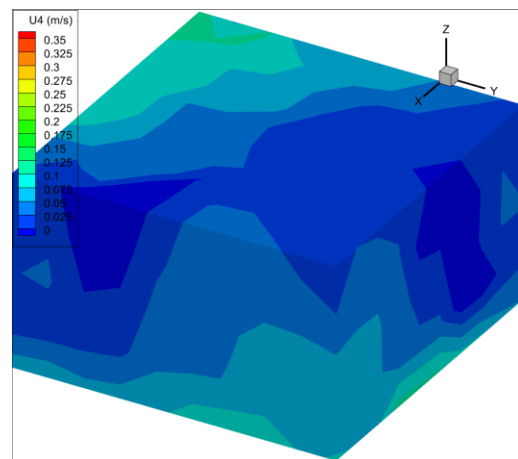


Figura 63: VSa min 4

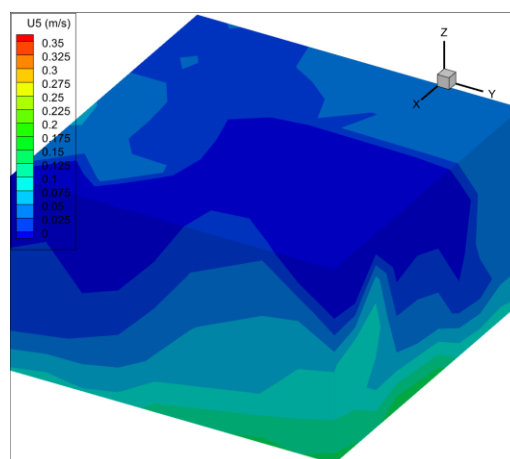


Figura 64: VSa min 5

4.2.2 IAQ

In questa sezione sono stati riportati i risultati ottenuti nelle prove descritte nel capitolo 3.6. Nei grafici si possono vedere gli andamenti dei ppm misurati all'interno della test room nei minuti della prova. Sono stati riportati solo i valori assunti dal momento iniziale della prova fino al primo valore al di sotto di 1 ppm.

Per comprendere al meglio i risultati, bisogna andare a focalizzarsi sui picchi di ppm registrati dal sensore e il decadimento nel tempo di ppm all'interno della test room dovuto ai pannelli.

I primi grafici (Grafico 10, Grafico 11) mostrati sono quelli relativi alle prove effettuate con lo spruzzatore, in cui si diluiva 1 ml di MEK con 100 ml di acqua e poi nebulizzati in ambiente.

Di queste prove ne sono state effettuate due identiche per andare a verificarne la riproducibilità.

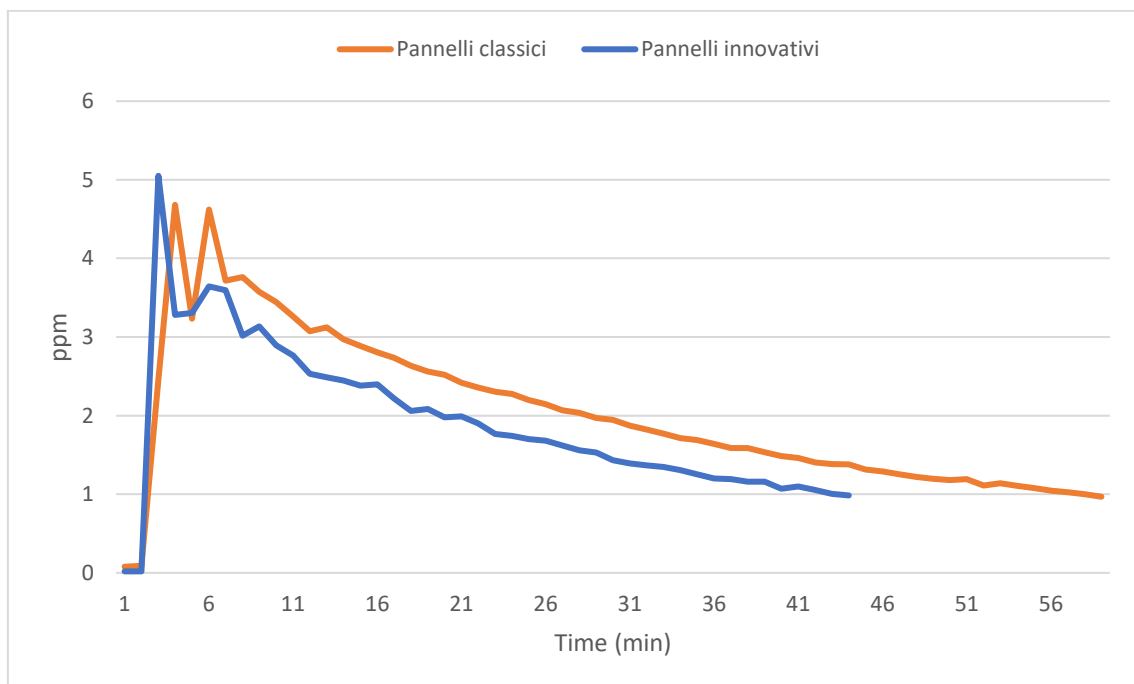


Grafico 10: Decadimento ppm prova 1 con spruzzatore

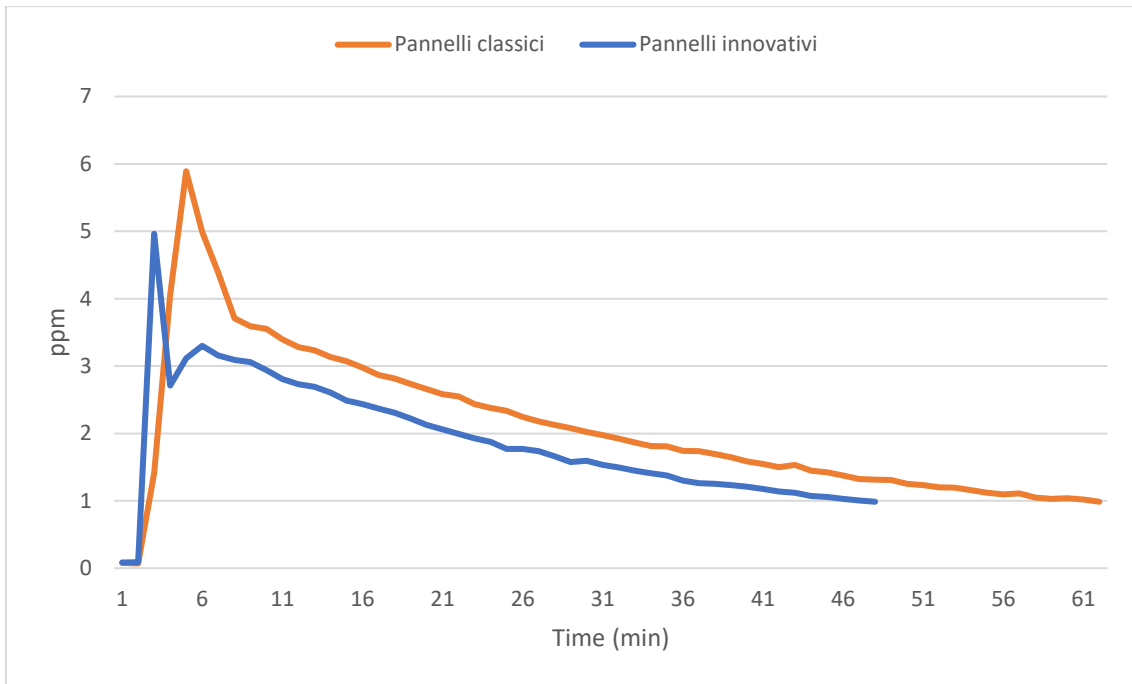


Grafico 11: Decadimento ppm prova 2 con spruzzatore

Le prove di seguito esposte sono invece quelle relative alle prove effettuate con il MEK posto su un vetrino da orologio posizionato davanti alla sorgente di ventilazione VS e lasciato evaporare. Ciascun grafico è riferito ad una posizione del sensore all'interno della test room come riportato nel Grafico 12, Grafico 13, Grafico 14.

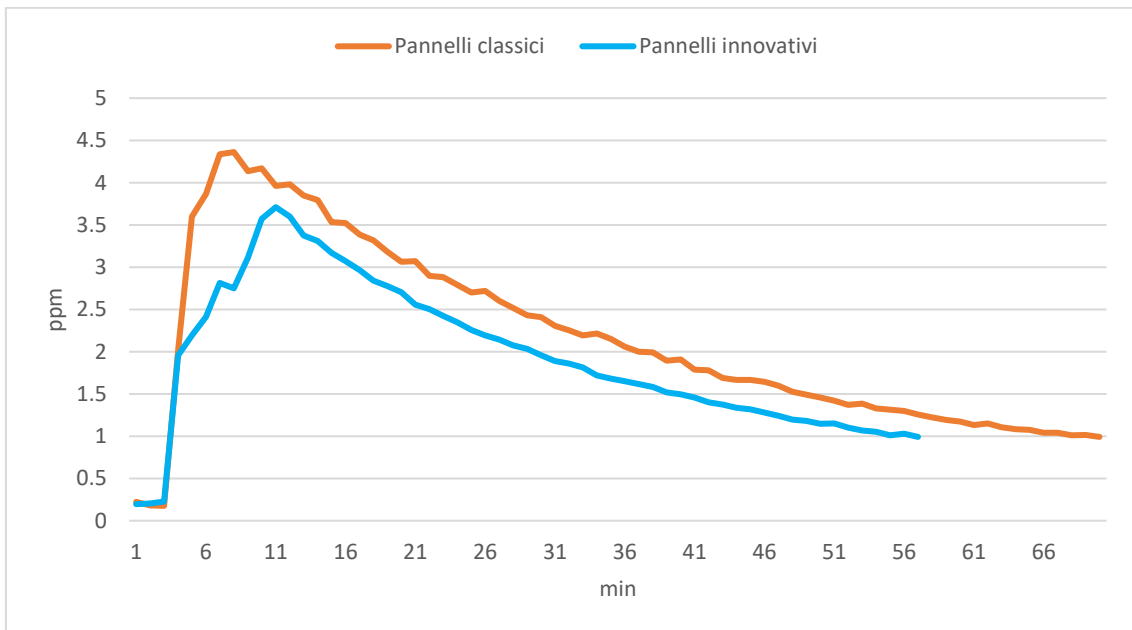


Grafico 12: Decadimento ppm posizione 1 con vetrino

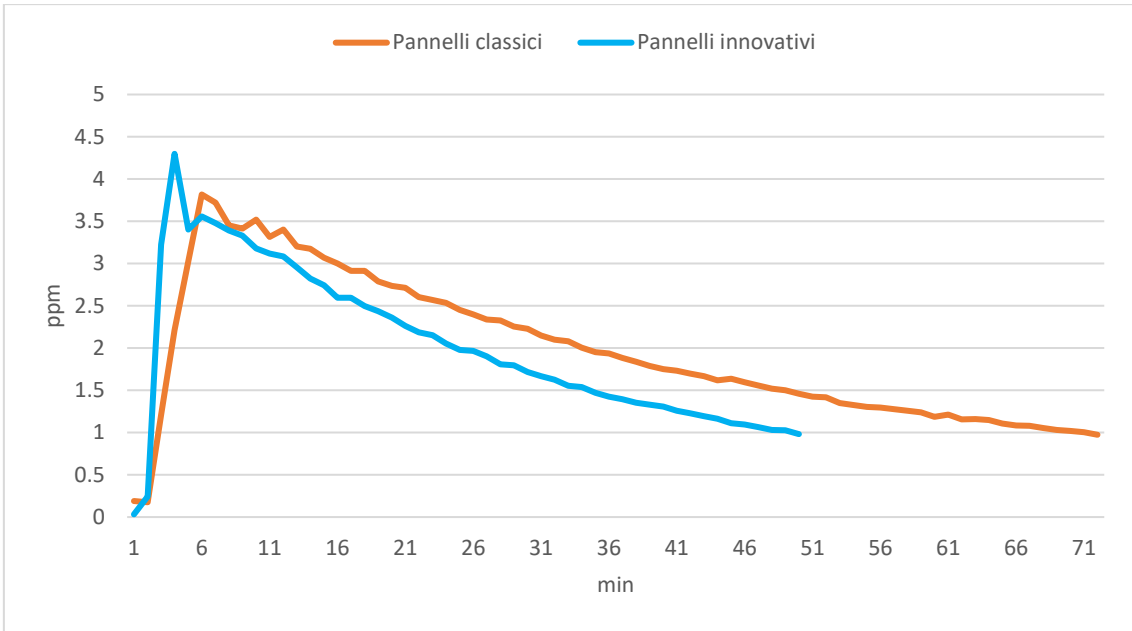


Grafico 13: Decadimento ppm posizione 2 con vetrino

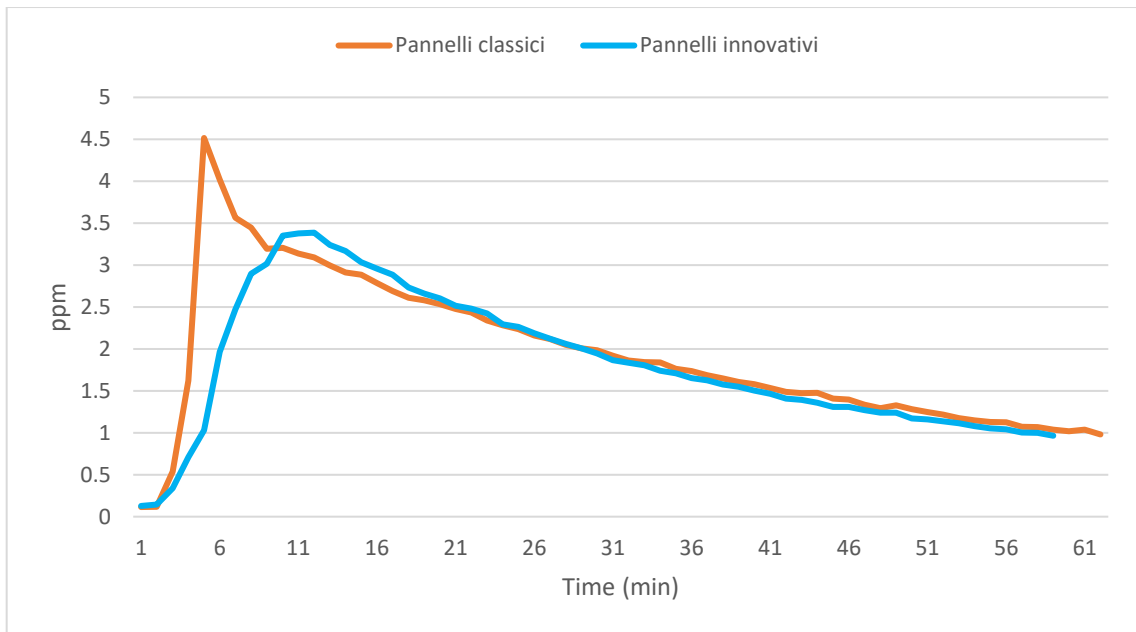


Grafico 14: Decadimento ppm posizione 3 con vetrino

5. Discussione

In questa sezione verranno discussi i risultati delle prove effettuate nella test room. La prima parte riguarderà la valutazione sull'efficacia di rilevazione della presenza di persone realizzata con la griglia di termocoppie installata sul controsoffitto. La seconda parte, invece, sarà un confronto tra la tipologia di pannelli classica e quella innovativa. Le prove condotte hanno riguardato, in particolare, l'efficienza di questi pannelli nell'assorbire composti organici volatili presenti nell'ambiente.

5.1 Efficacia della rilevazione della presenza

Con questo sistema di termocoppie si è raggiunto un importante risultato: andare a determinare in quali zone di un ambiente sono presenti persone. Questo è fondamentale per poter andare a migliorare comfort solamente nelle zone degli ambienti dove sarà ritenuto necessario. Un obiettivo simile, ma con l'uso di diverse tecniche, è stato presentato da Wagner et al. [21]. Nel loro studio, è stata utilizzata una griglia di termocoppie all'interno di un ambiente di tipo ufficio per rilevare la presenza di persone, basandosi anch'essi sulla variazione di temperatura. Tuttavia, a differenza del nostro lavoro, i sensori sono stati posizionati direttamente sulle sedie. Le due prove messe a confronto avevano scopi diversi: nel nostro caso, ci si è concentrati sulla capacità di rilevare la presenza di persone basandosi sulla variazione di temperatura, mentre nel loro caso, l'attenzione era incentrata ai tempi di occupazione dell'ambiente.

Effettuando un confronto tra il nostro metodo e quello appena citato si possono già andare a visualizzare i punti di forza e i punti che andrebbero migliorati del sistema messo da noi a punto. Una delle principali vantaggi dell'applicazione dei sensori direttamente al controsoffitto è che consente agli utenti di non essere limitati nell'uso del mobilio, il che è di fondamentale importanza in ambienti come le scuole, come nel nostro caso. Un ulteriore vantaggio del nostro sistema è la capacità di ottenere una mappa bidimensionale della distribuzione termica all'interno della stanza. Ciò permette di valutare in modo preciso dove siano necessari interventi correttivi sulle condizioni interne e dove, invece, non lo siano.

Uno degli aspetti che dovranno essere migliorati, invece, è quello che riguarda la presenza di persone che, nel caso di Wagner è molto più preciso e si riesce ad avere un conteggio preciso, minuto per minuto, delle persone ma solamente se sono sedute.

Di seguito verranno riportati due grafici, il primo è relativo al nostro andamento nel tempo delle temperature della termocoppia posizionata al di sopra della lampada che simulava la presenza di una persona, il secondo invece è preso dall'articolo di cui sopra e mostra lo stesso andamento.

Quello che possiamo osservare è che nel primo caso, come mostrato nel Grafico 15, con un sensore installato a soffitto, si evidenzia un aumento e una diminuzione della temperatura in quella specifica zona dell'ambiente. Nel secondo caso, raffigurato nella Grafico 16, con il sensore installato sulla sedia, non si ha una comprensione completa di ciò che accade nell'intera stanza, ma si ha una maggiore conoscenza di quanto avviene specificamente sulla sedia, consentendo di rilevare la presenza delle persone.

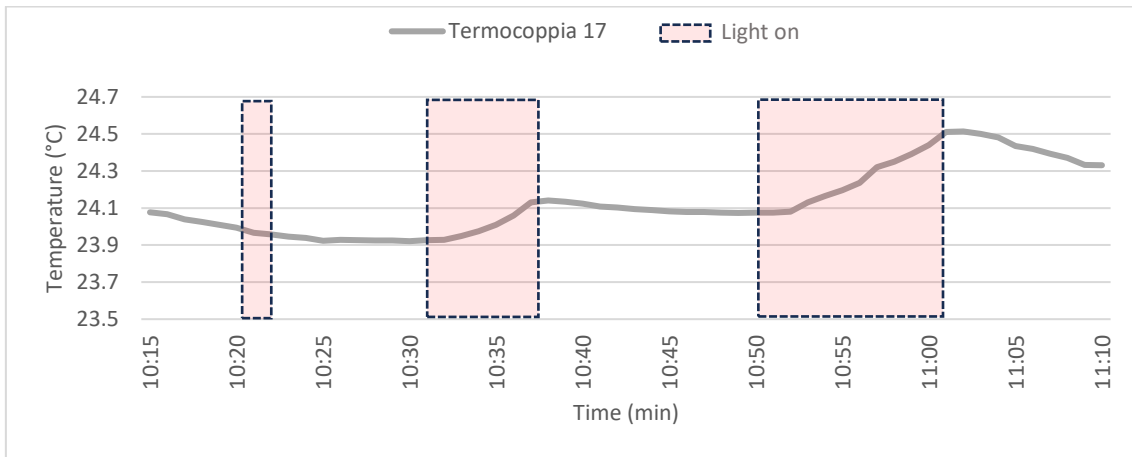


Grafico 15: Andamento temperatura durante una prova nella test room

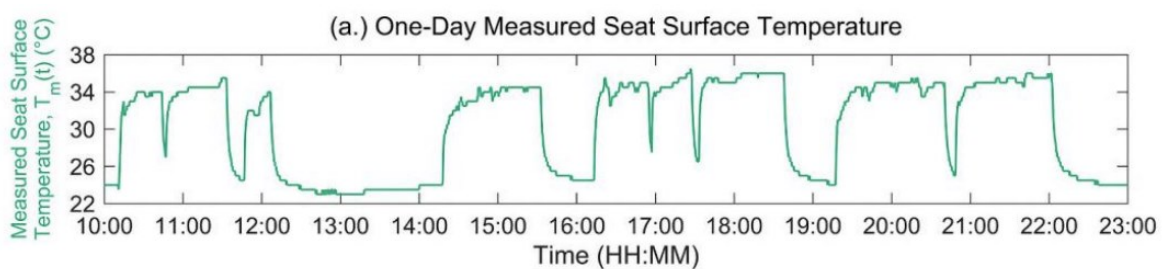


Grafico 16: Andamento temperatura durante una prova. Grafico preso dall'articolo di Wagner et al. [21]

5.2 Valutazione della stratificazione dell'aria per diverse sorgenti

Si può notare nel Grafico 6 e nel Grafico 7 come le velocità della ventola della pompa di calore (VPdC) sono simili a quelle della ventola dello scaldabagno (VS), in entrambi i casi si notano velocità superiori ai 0,2 m/s, non accettabili in un ambiente scolastico. Si nota però che nei risultati delle velocità VSc si abbiano picchi superiori agli 0,3 m/s nella sonda posta a 0,6 m di altezza. Esaminando le velocità dell'aria nelle diverse posizioni, si può osservare che tali anomalie sono presenti solamente nella prima posizione. Questa irregolarità è stata causata dal fatto che, al fine di ricreare le stesse condizioni della prima prova effettuata con il VPdC, la velocità dell'aria nella prima posizione, dove sono stati posizionati i sensori di velocità dell'aria, era esattamente di fronte al rilevatore dell'aria, situato a 0,6 metri dal pavimento. Escludendo i dati rilevati dalla sonda a mezza altezza registrati nei primi cinque minuti, si nota un maggior equilibrio e uniformità nei valori di velocità dell'aria ottenuti con la VSc rispetto alla VPdC.

Si evince dai grafici che gli andamenti delle velocità di VPdC sono maggiori rispetto a VSc. Per queste ragioni si è scelto di utilizzare la ventola dello scaldabagno VS come sistema di diffusione e distribuzione dell'aria all'interno dell'ambiente. Dalle prove effettuate si evince però che siamo comunque al di sopra dei valori fissati dalla UNI 10339:1995 per quanto riguarda gli ambienti scolastici. Per ovviare a questo problema, il sistema di ventilazione è stato posto e direzionato all'angolo tra la parete Sud e la parete Est, come è stato precedentemente riportato in Grafico 9. Sono stati ottenuti dei valori molto inferiori di velocità dell'aria e al di sotto dei valori minimi fissati dalla normativa di riferimento. Questo lo si può notare comparando le distribuzioni delle medie delle velocità effettuate in questi confronti come riportato in Grafico 17.

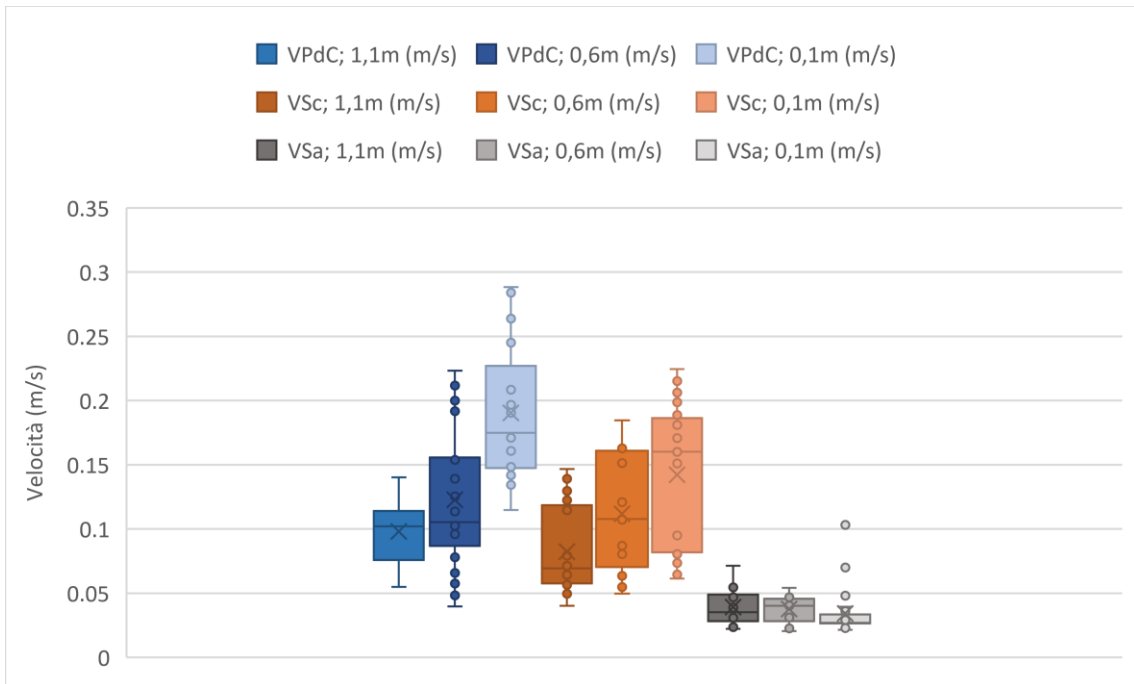


Grafico 17: Confronto velocità VPdC, VS

5.3 Efficienza di assorbimento VOC dei pannelli innovativi

Per quanto riguarda il confronto tra i pannelli classici e quelli innovativi, anche in questo caso è necessario distinguere. Riguardo al test effettuato con lo spruzzatore, non si osserva una marcata variazione nella forma della curva di decadimento, ma piuttosto una diminuzione dell'apice del picco.

Diverso discorso invece per quanto riguarda il test effettuato con l'evaporazione dell'inquinante. In questo caso, si notano dei miglioramenti per tutte le tre prove:

- Il raggiungimento del picco impiega un tempo maggiore sui pannelli innovativi rispetto ai pannelli classici. Nei successivi tre grafici (Grafico 18, Grafico 19, Grafico 20) è stato eseguito uno zoom sui picchi per andare ad evidenziare i delay di tempo nel raggiungimento dei picchi tra i pannelli classici e i pannelli innovativi;

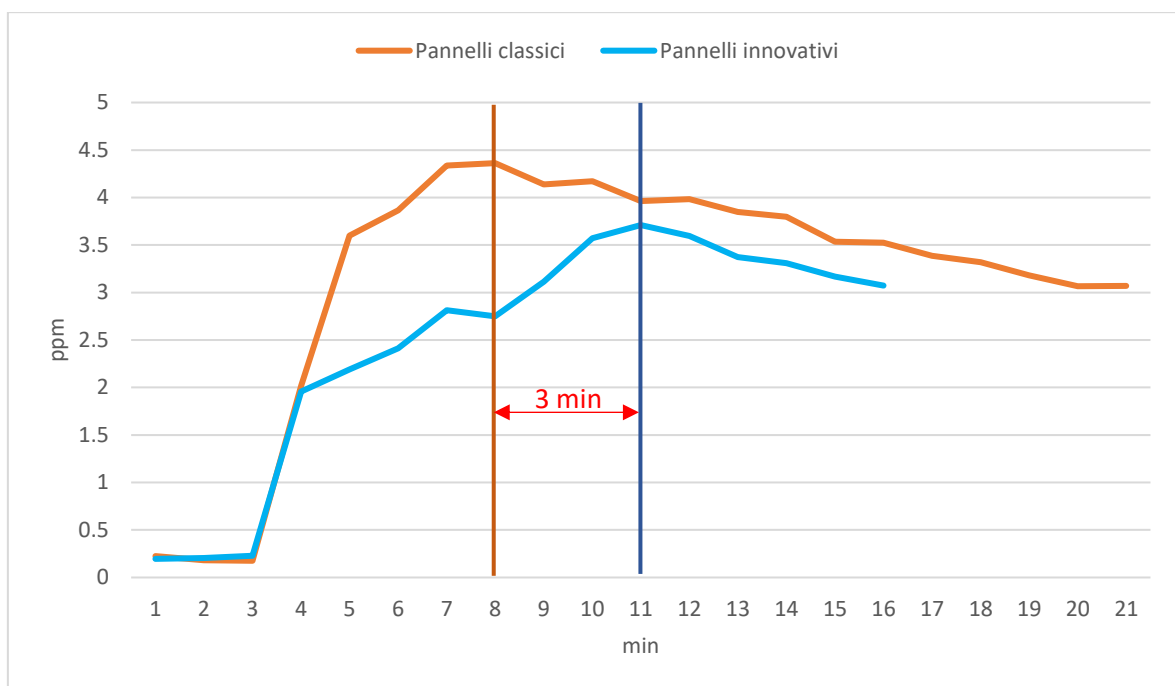


Grafico 18: Δt picco tra pannelli classici e pannelli innovativi, posizione 1

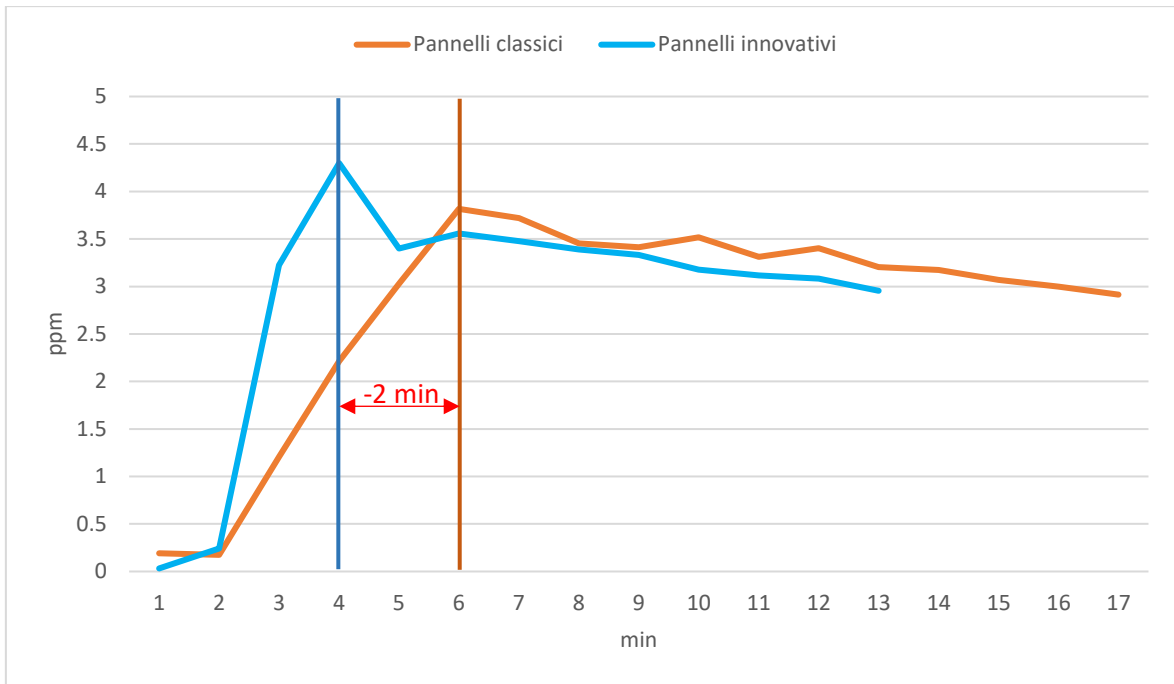


Grafico 19: Δt picco tra pannelli classici e pannelli innovativi, posizione 2

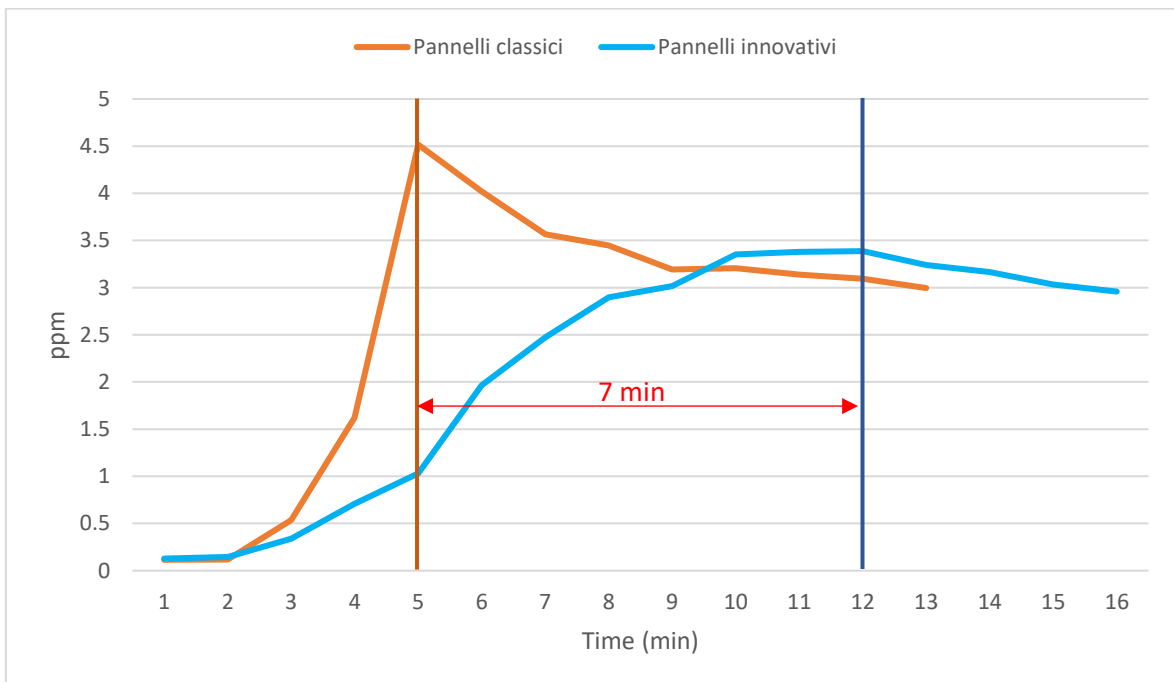


Grafico 20: Δt picco tra pannelli classici e pannelli innovativi, posizione 3

- Il picco, soprattutto nella prima e terza prova, ha un valore di circa 1 ppm minore nei pannelli innovativi rispetto ai pannelli classici (Grafico 21);

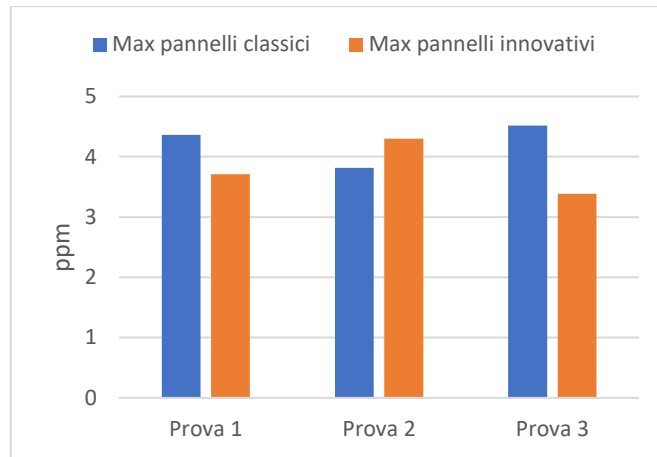


Grafico 21: ppm massimi registrati nelle 3 prove

- Il decadimento avviene più velocemente nei pannelli innovativi. Questo lo si può notare bene nel Grafico 22, Grafico 23, Grafico 24, dove sono riportate le polilinee di secondo grado che raffigurano il decadimento di ppm all'interno dell'ambiente. Nel Grafico 23, ad esempio, i pannelli innovativi hanno registrato un valore massimo maggiore rispetto ai classici ma si nota come riescano a raggiungere un valore inferiore ad 1 ppm più velocemente

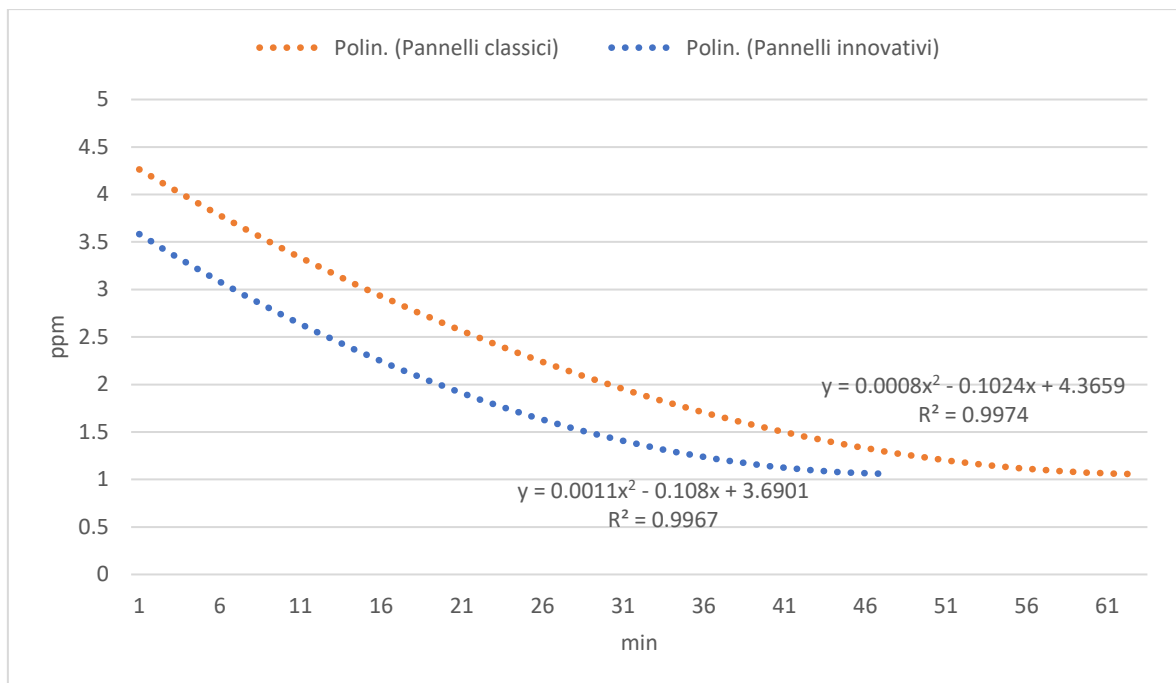


Grafico 22: Curva decadimento ppm, pannelli classici e pannelli innovativi, posizione 1

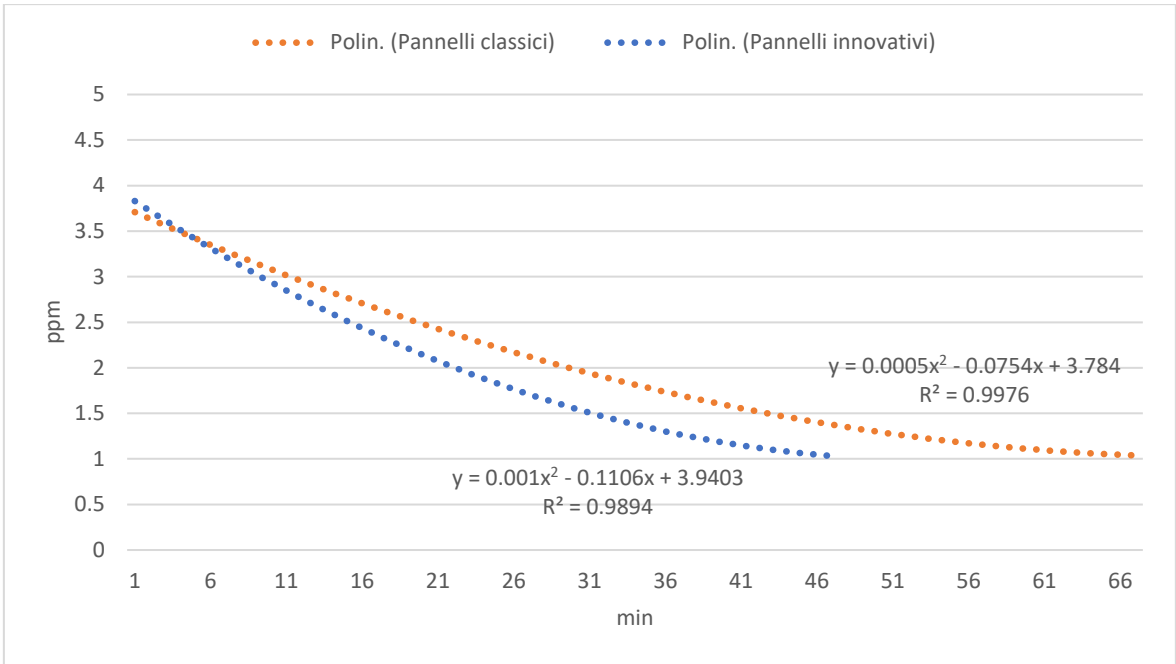


Grafico 23: Curva decadimento ppm, pannelli classici e pannelli innovativi, posizione 2

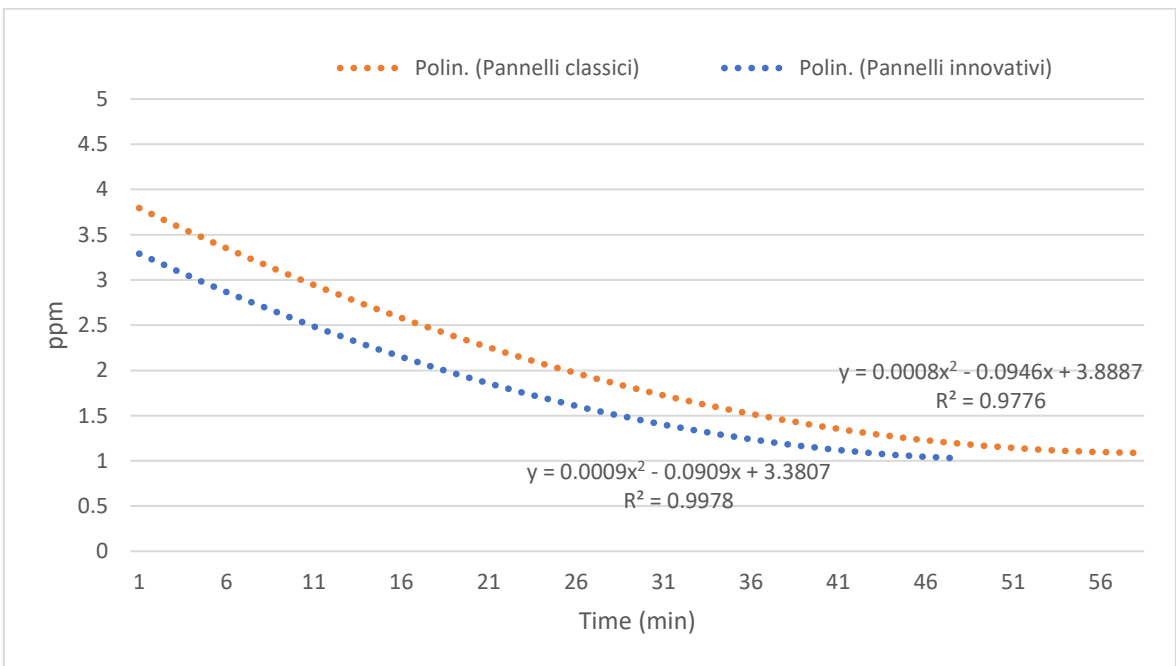


Grafico 24: Curva decadimento ppm, pannelli classici e pannelli innovativi, posizione 3

6. Conclusioni

Gli obiettivi iniziali che ci si era posti erano principalmente due:

- realizzare una griglia di sensori di temperatura da installare sul controsoffitto con il fine di riuscire a rilevare la presenza di persone all'interno dell'ambiente;
- effettuare un confronto tra due tipologie di pannelli, classici e innovativi. Valutare il comportamento di queste due tipologie di pannelli sulla capacità di assorbire composti organici volatili presenti nell'aria.

Per quanto concerne l'implementazione della griglia di sensori, si è verificato che il sistema ha dimostrato un elevato grado di efficacia nel raggiungere l'obiettivo inizialmente proposto, ossia la rilevazione della presenza di individui in specifiche aree all'interno della stanza. Date le condizioni della test room ed il periodo in cui sono state svolte le prove, le temperature della test room si attestavano attorno ai 23 °C, leggermente superiori alla temperatura tipica di un'aula scolastica (pari a 20 °C) nel periodo invernale, ma comunque molto verosimili anche considerato il fatto che in un ambiente scolastico, al set point dell'impianto di riscaldamento, va aggiunto un surriscaldamento dovuto alla presenza degli studenti. Ciò è confermato anche da monitoraggi preliminari fatti in alcune scuole.

Si tratta di un approccio innovativo che richiede, comunque, ulteriori analisi dettagliate, soprattutto dal punto di vista termico. Questa tesi ha principalmente concentrato la sua indagine sulla rilevazione della presenza, ma il futuro sviluppo mira a comprendere anche il comfort termico, al fine di creare condizioni realistiche in varie posizioni all'interno dell'aula. Dal punto di vista dell'IAQ, i pannelli installati in seconda fase si sono dimostrati efficaci nell'assorbimento di VOC, questo si è visto soprattutto nel caso di utilizzo del vetrino. Sono stati in grado sia di attenuare il picco che di diminuire il tempo di decadimento di questi composti presenti nell'aria. Installandoli in un ambiente scolastico quasi sicuramente apporterà dei benefici agli occupanti.

La costante ricerca e lo sviluppo nel settore del comfort termico localizzato e multidominio sono fondamentali per garantire un futuro più confortevole e sostenibile, portando con sé significative migliorie nella qualità della nostra vita e in quella degli studenti.

Bibliografia

- [1] MIM, “Portale unico dei dati della scuola.”
- [2] “Education Education Education at a Glance 2016 OECD INDICATORS”.
- [3] B. Brunekreef and S. T. Holgate, “Air pollution and health,” *The Lancet*, vol. 360, no. 9341, pp. 1233–1242, Oct. 2002, doi: 10.1016/S0140-6736(02)11274-8.
- [4] L. Degelman and L. O. Degelman, “A Model for simulation of daylighting and occupancy sensors as an energy control strategy for office buildings”, Accessed: Aug. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/242719069>
- [5] P. Hoes, J. L. M. Hensen, M. G. L. C. Loomans, B. de Vries, and D. Bourgeois, “User behavior in whole building simulation,” *Energy Build*, vol. 41, no. 3, pp. 295–302, Mar. 2009, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2008.09.008.
- [6] C. Huizenga, S. Abbaszadeh, L. Zagreus, and E. Arens, “Air quality and thermal comfort in office buildings: Results of a large indoor environmental quality survey,” *HB 2006 - Healthy Buildings: Creating a Healthy Indoor Environment for People, Proceedings*, vol. 3, pp. 393–397, 2006.
- [7] R. F. Rupp, N. G. Vásquez, and R. Lamberts, “A review of human thermal comfort in the built environment,” *Energy Build*, vol. 105, pp. 178–205, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2015.07.047.
- [8] Y. C. Wu and A. Mahdavi, “Assessment of thermal comfort under transitional conditions,” *Build Environ*, vol. 76, pp. 30–36, Jun. 2014, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2014.03.001.
- [9] A. D. Galasiu and J. A. Veitch, “Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review,” *Energy Build*, vol. 38, no. 7, pp. 728–742, Jul. 2006, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2006.03.001.
- [10] N. G. Vardaxis, D. Bard, and K. Persson Waye, “Review of acoustic comfort evaluation in dwellings—part I: Associations of acoustic field data to subjective

- responses from building surveys,” *Building Acoustics*, vol. 25, no. 2, pp. 151–170, Jun. 2018, doi: 10.1177/1351010X18762687.
- [11] R. Risetto, M. Schweiker, and A. Wagner, “Personalized ceiling fans: Effects of air motion, air direction and personal control on thermal comfort,” *Energy Build*, vol. 235, p. 110721, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2021.110721.
- [12] W. O’Brien *et al.*, “Introducing IEA EBC annex 79: Key challenges and opportunities in the field of occupant-centric building design and operation,” *Build Environ*, vol. 178, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106738.
- [13] Z. Jin, J. Li, Q. Wang, W. Su, X. Duan, and Z. Tang, “Characterization of multifunctional panels from jute fibers for interior wall covering,” *Ind Crops Prod*, vol. 167, p. 113530, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.INDCROP.2021.113530.
- [14] S. Mousavi, B. Rismanchi, S. Brey, and L. Aye, “Lessons learned from PCM embedded radiant chilled ceiling experiments in Melbourne,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 54–61, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.01.032.
- [15] S. Guichard, F. Miranville, D. Bigot, and H. Boyer, “A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate: Model description and elements of validation,” *Energy Build*, vol. 70, pp. 71–80, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2013.11.079.
- [16] ANSI/ASHRAE Standard 62.1, “Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality,” 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344489124>
- [17] A. Ebenstein *et al.*, “The Long-Run Economic Consequences of High-Stakes Examinations: Evidence from Transitory Variation in Pollution,” *Am Econ J Appl Econ*, vol. 8, no. 4, pp. 36–65, 2016, doi: 10.1257/APP.20150213.
- [18] “WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide,” 2006.
- [19] “ IEC 61591:1997+A1:2005”.
- [20] “UNI 10339:1995 Impianti aeraulici al fine di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d’offerta, l’offerta, l’ordine e la fornitura.”.

- [21] D. N. Wagner, A. Mathur, and B. E. Boor, "Spatial seated occupancy detection in offices with a chair-based temperature sensor array," *Build Environ*, vol. 187, p. 107360, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2020.107360.

Appendice 1

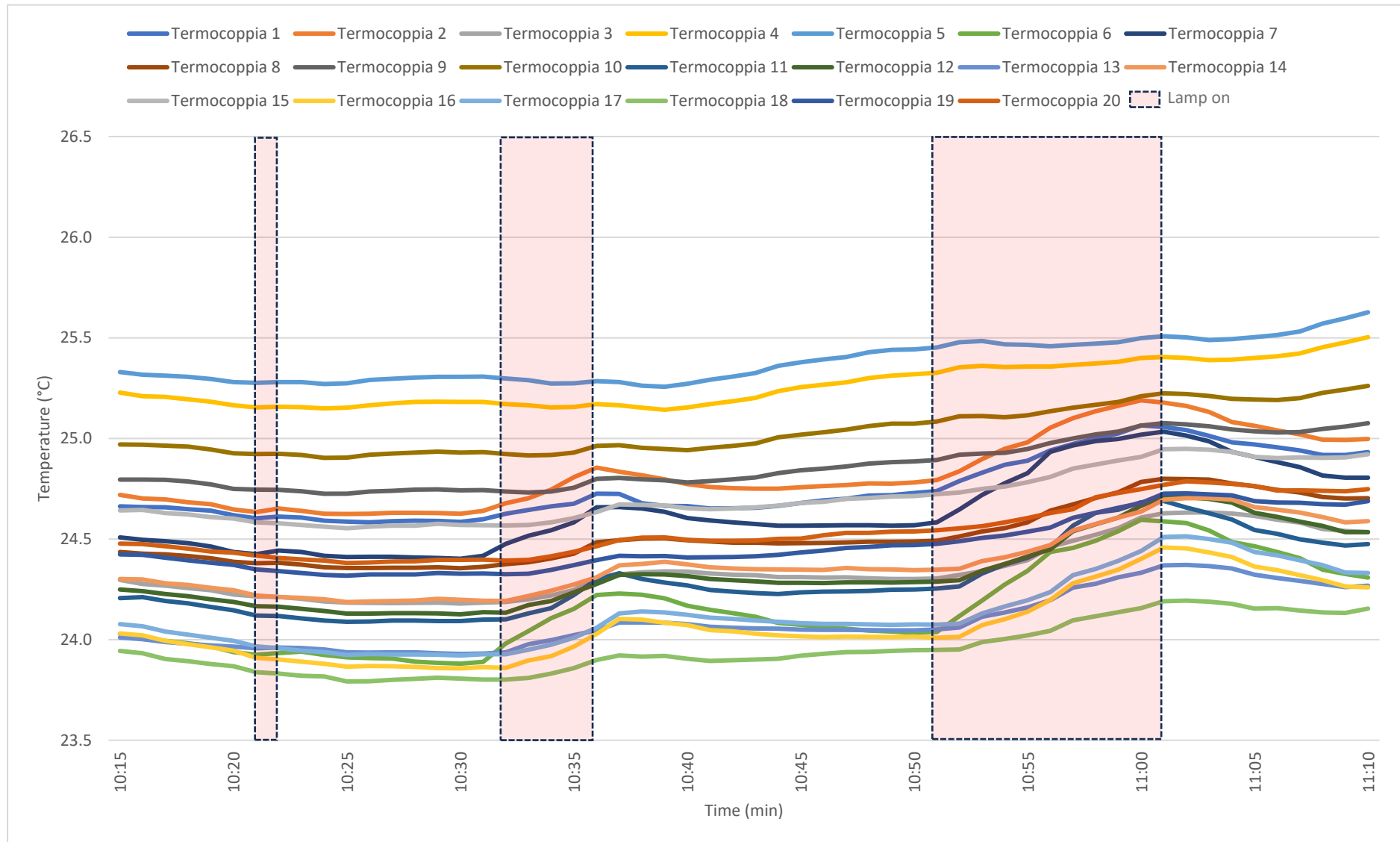


Grafico 25: Accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 1

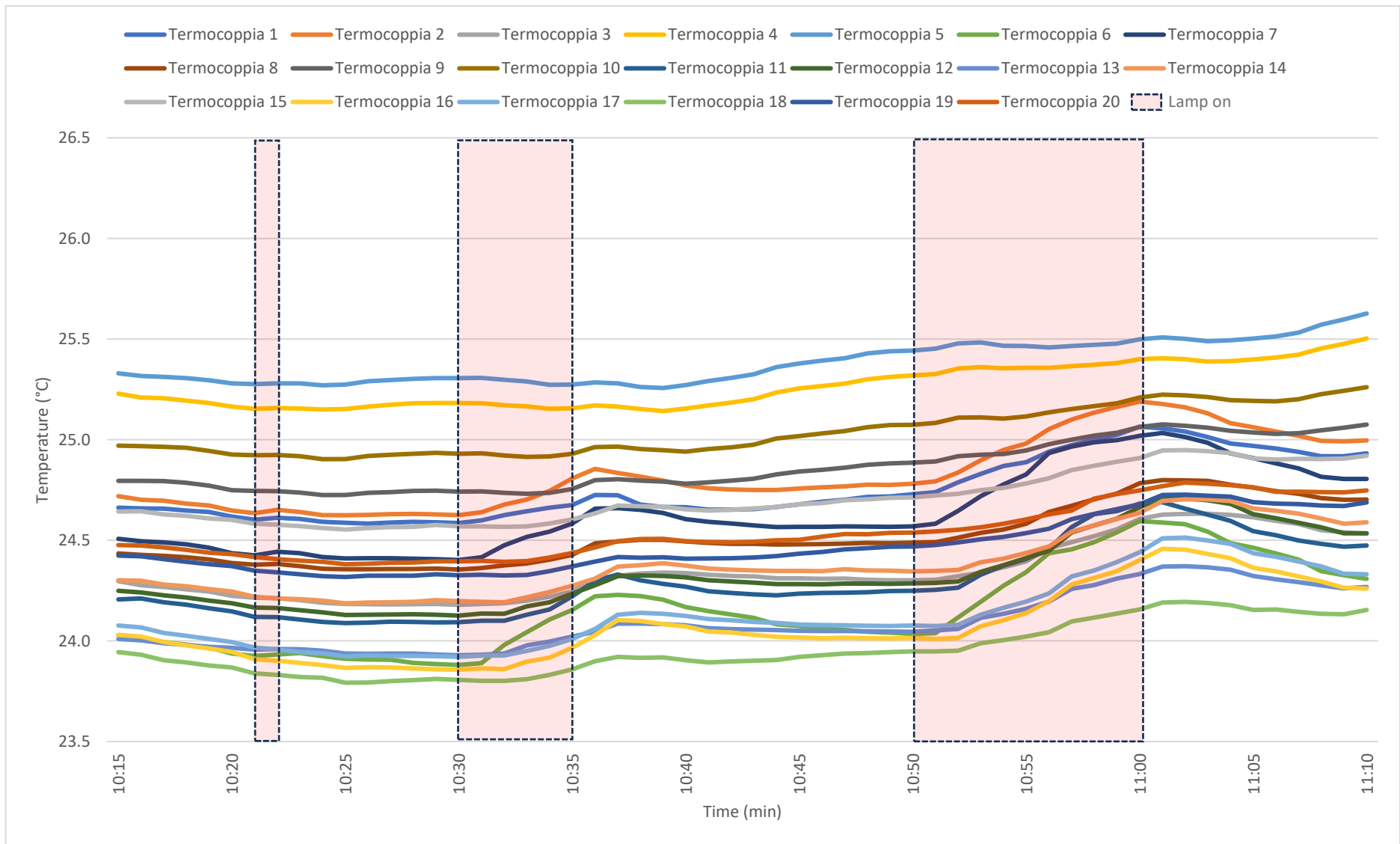


Grafico 26: Accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 2

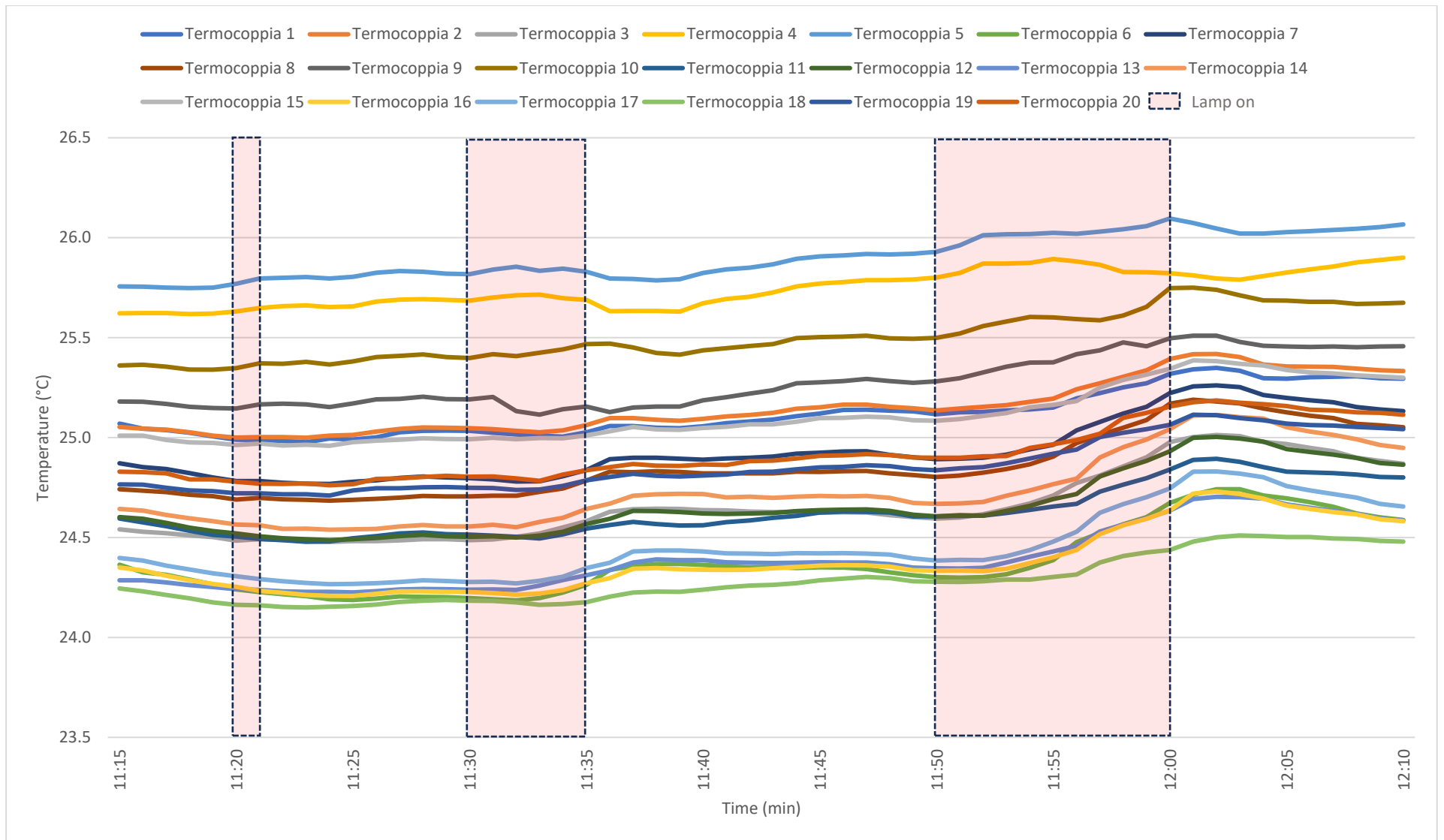


Grafico 27: Accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 3

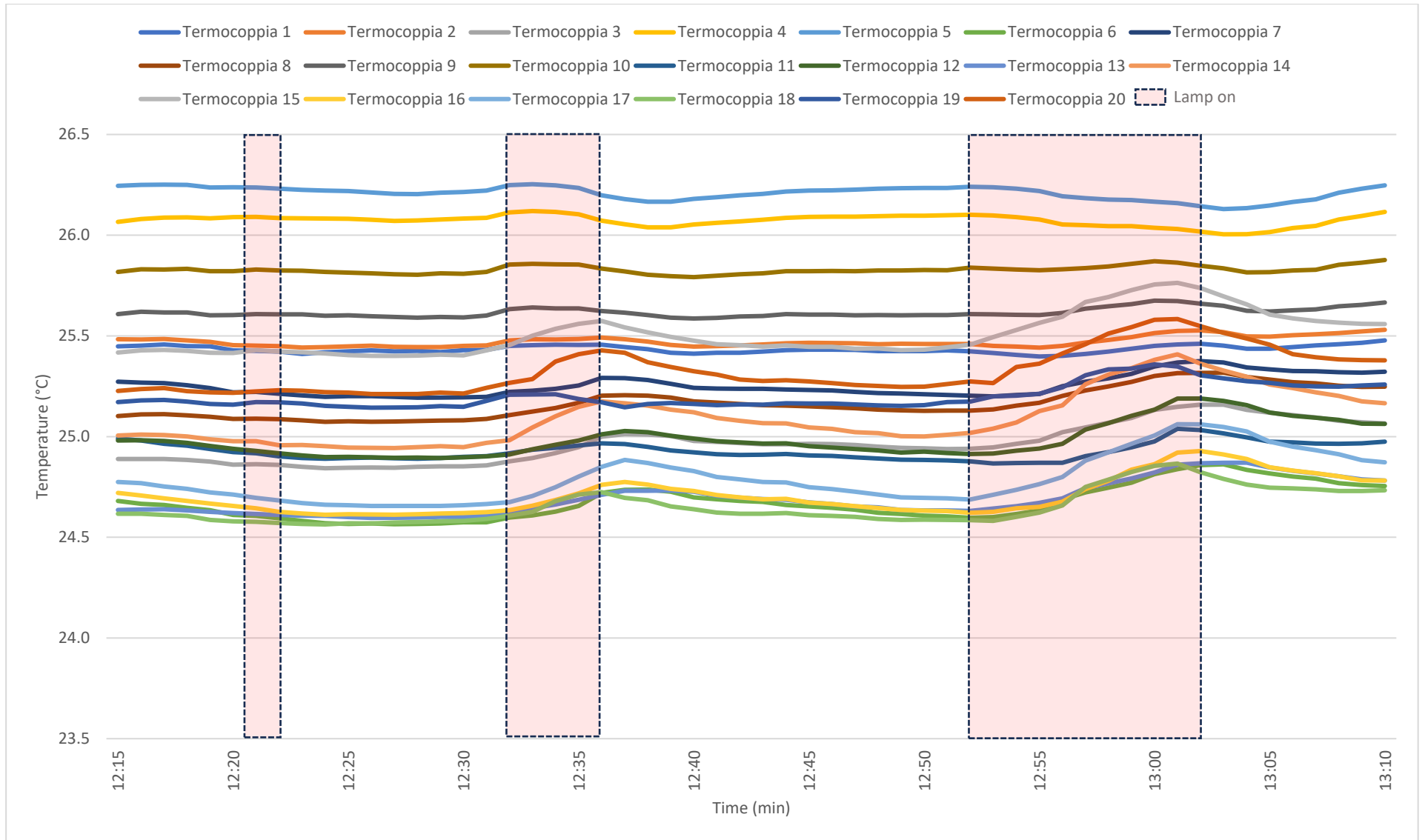


Grafico 28: Accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 4

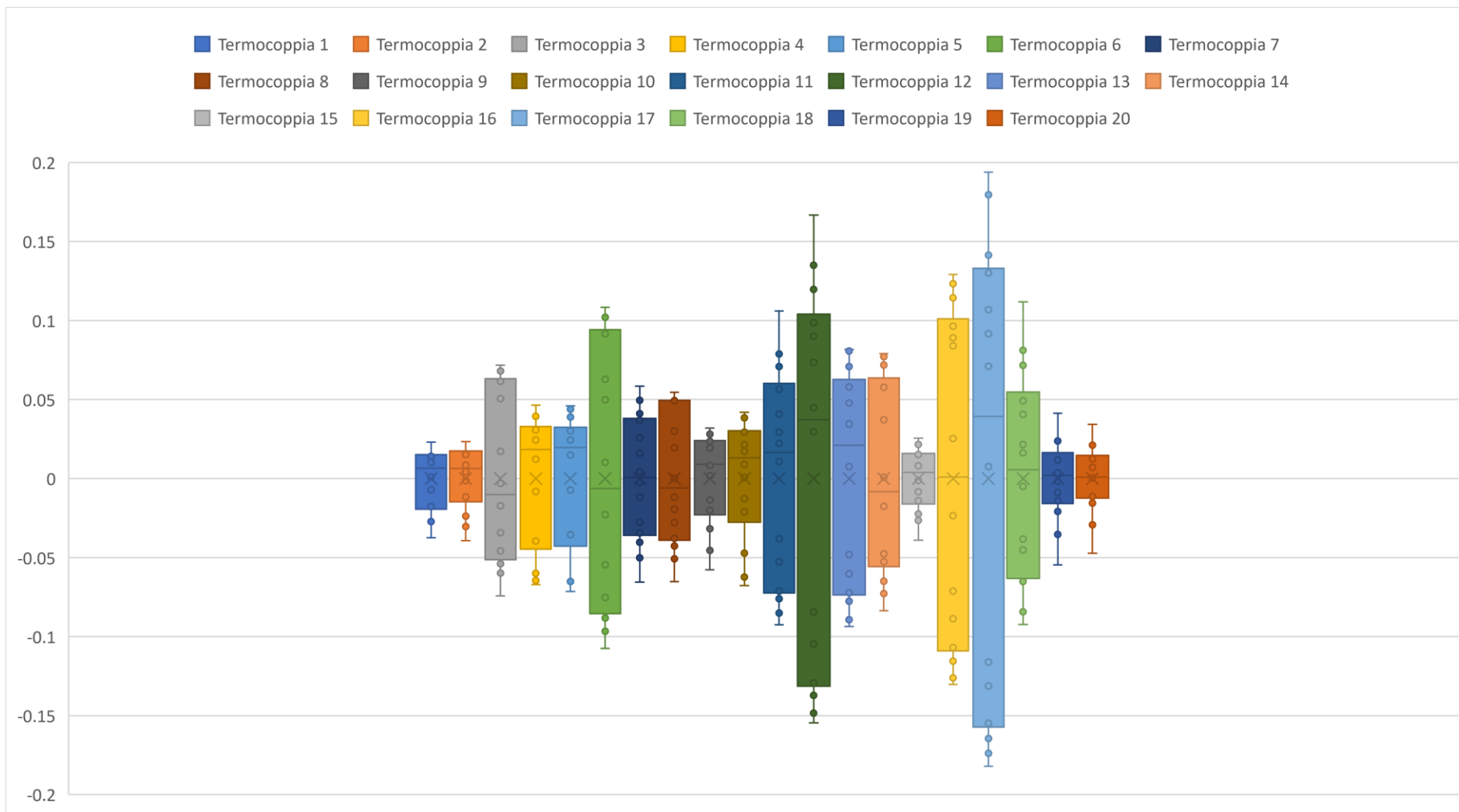


Grafico 29: Box Plot accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 1

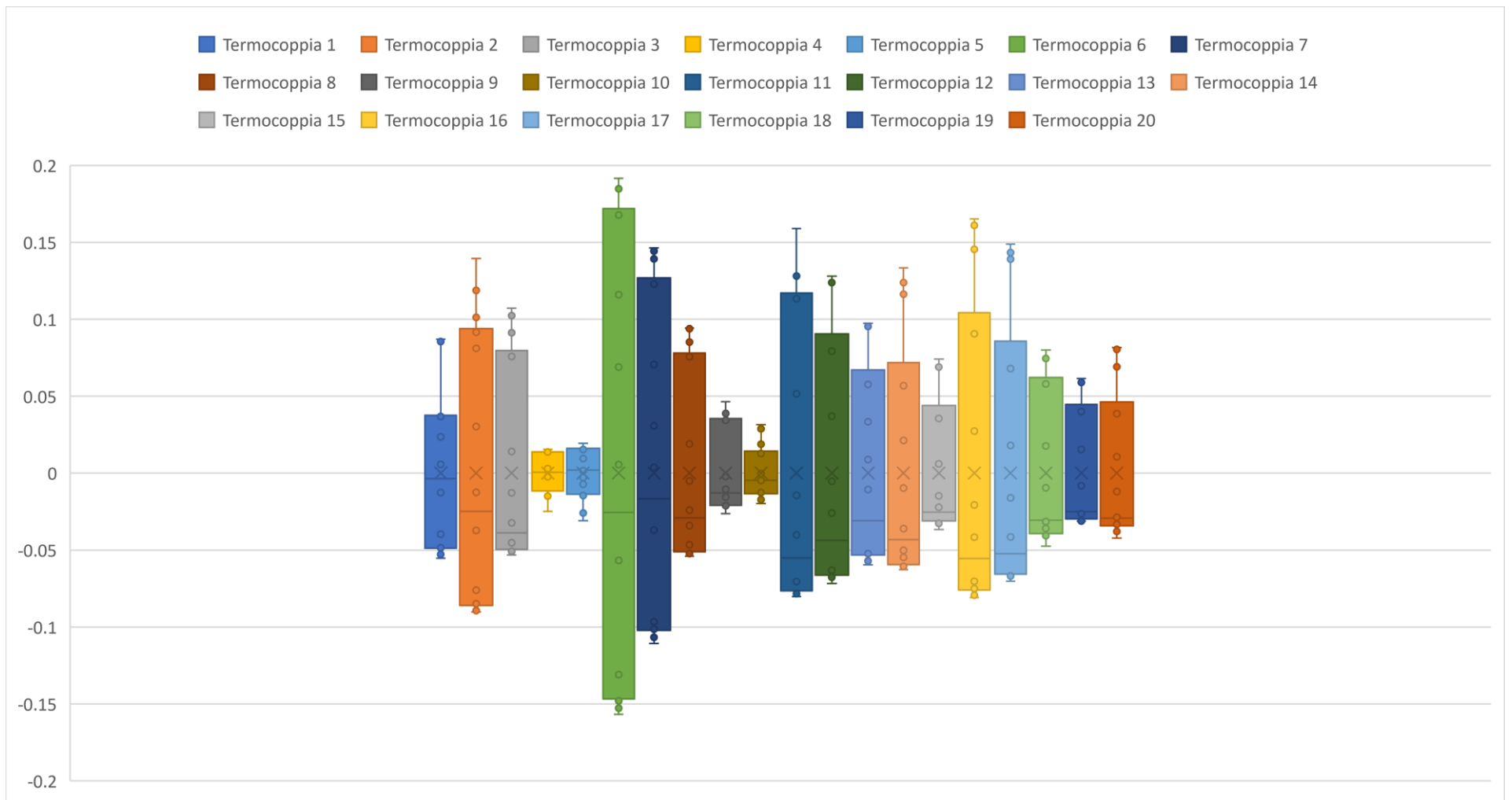


Grafico 30: Box Plot accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 2

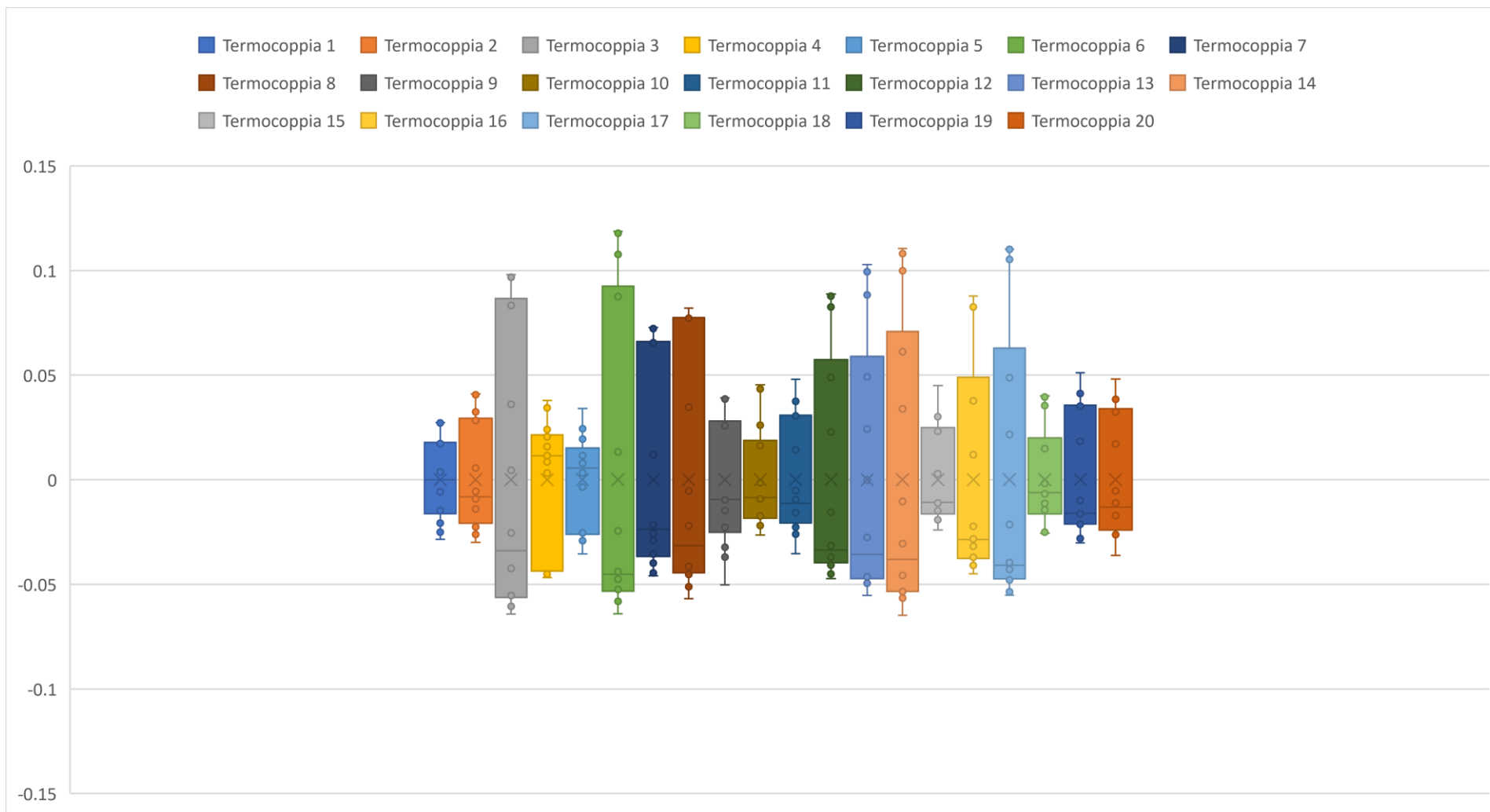


Grafico 31: Box Plot accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 3

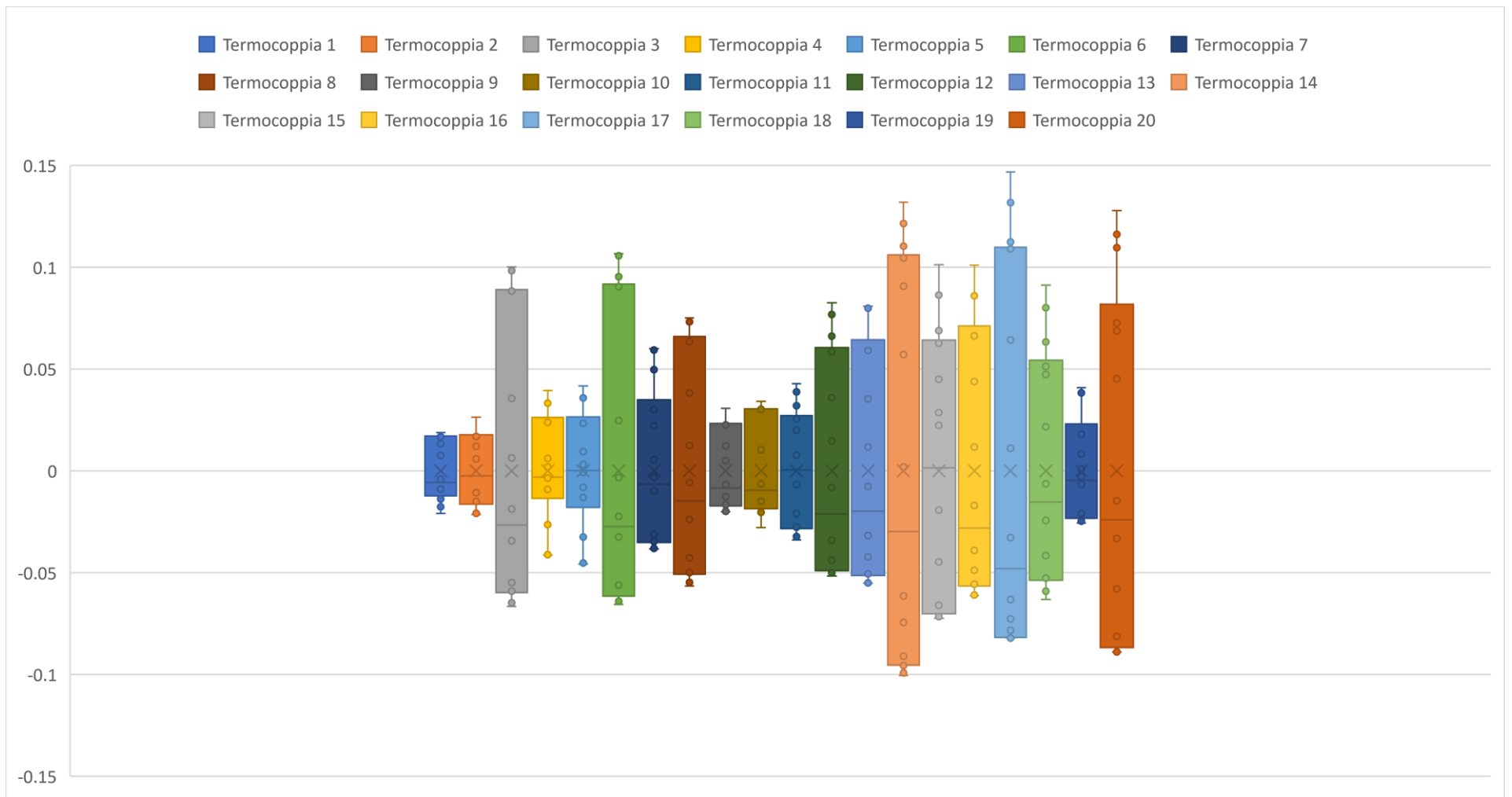


Grafico 32: Box Plot accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 4

Appendice 2

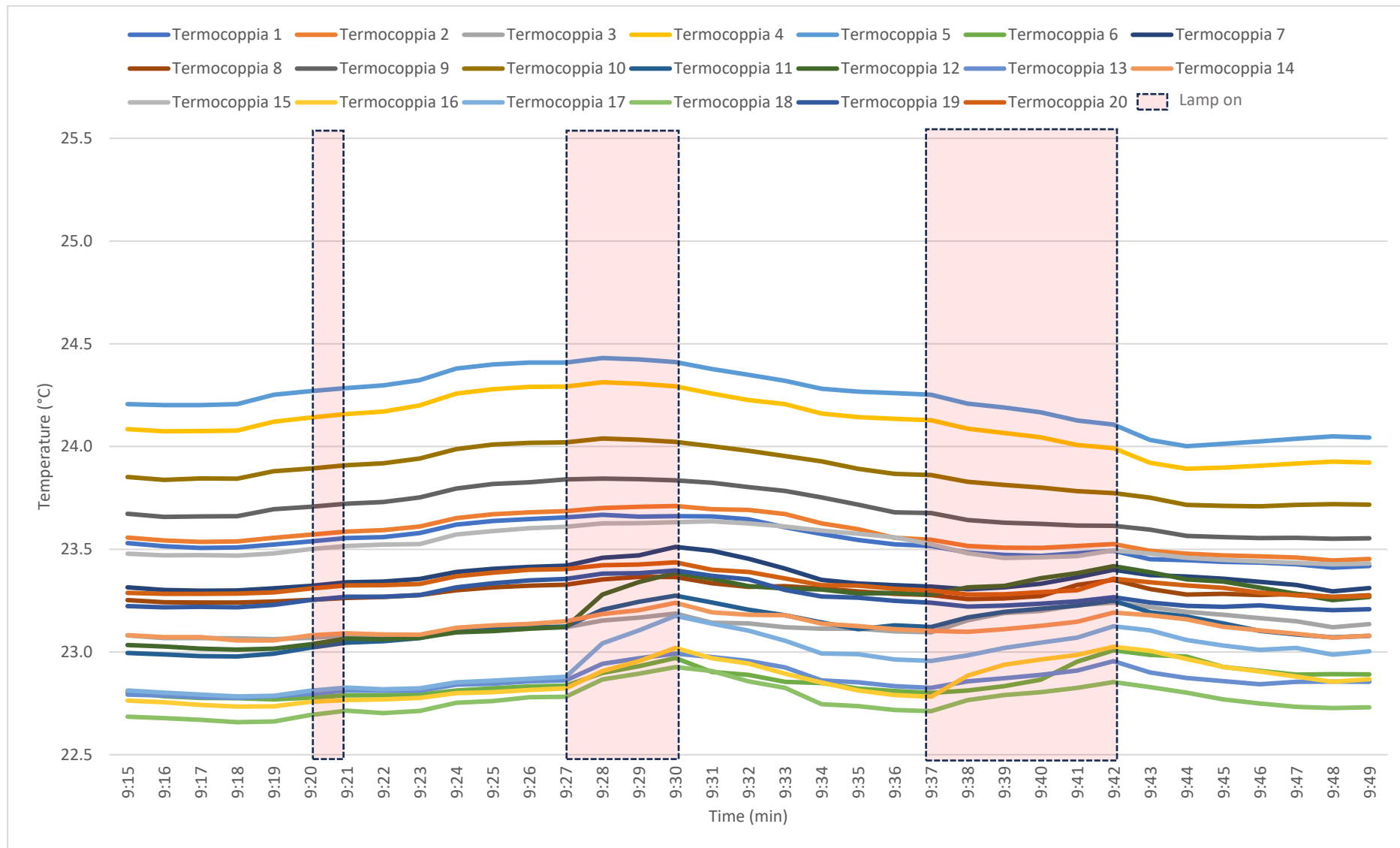


Grafico 33: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 1

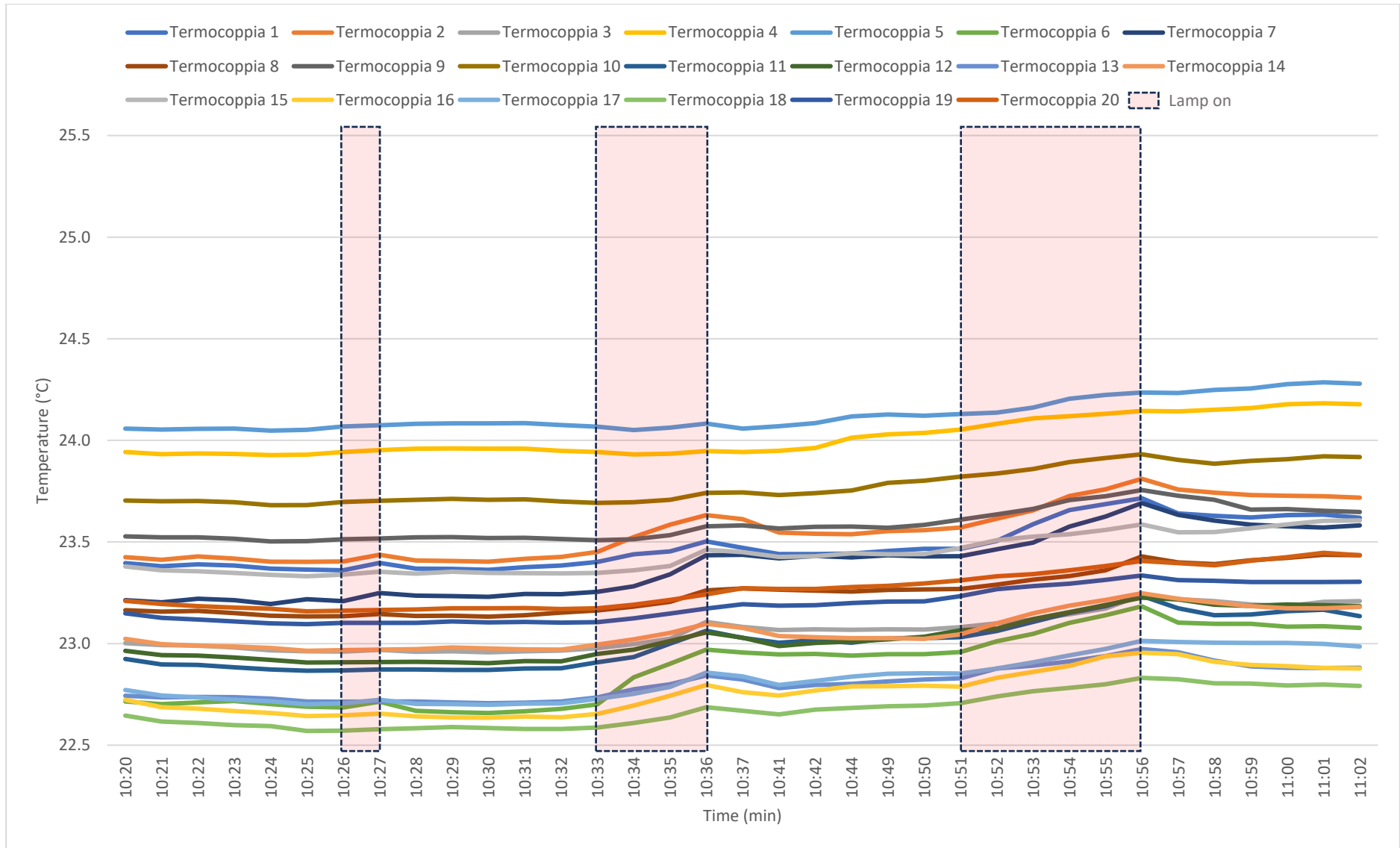


Grafico 34: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 2

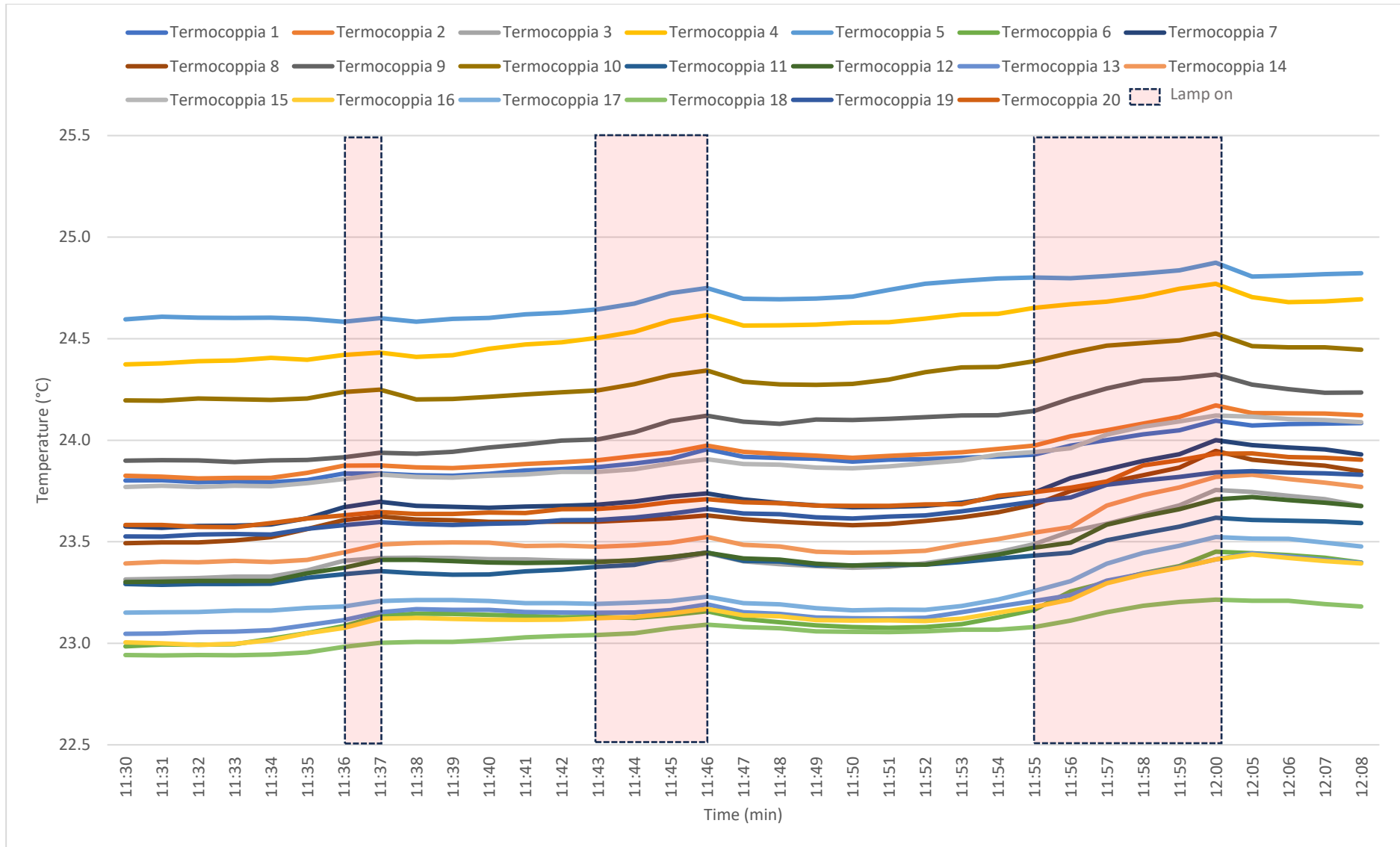


Grafico 35: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 3

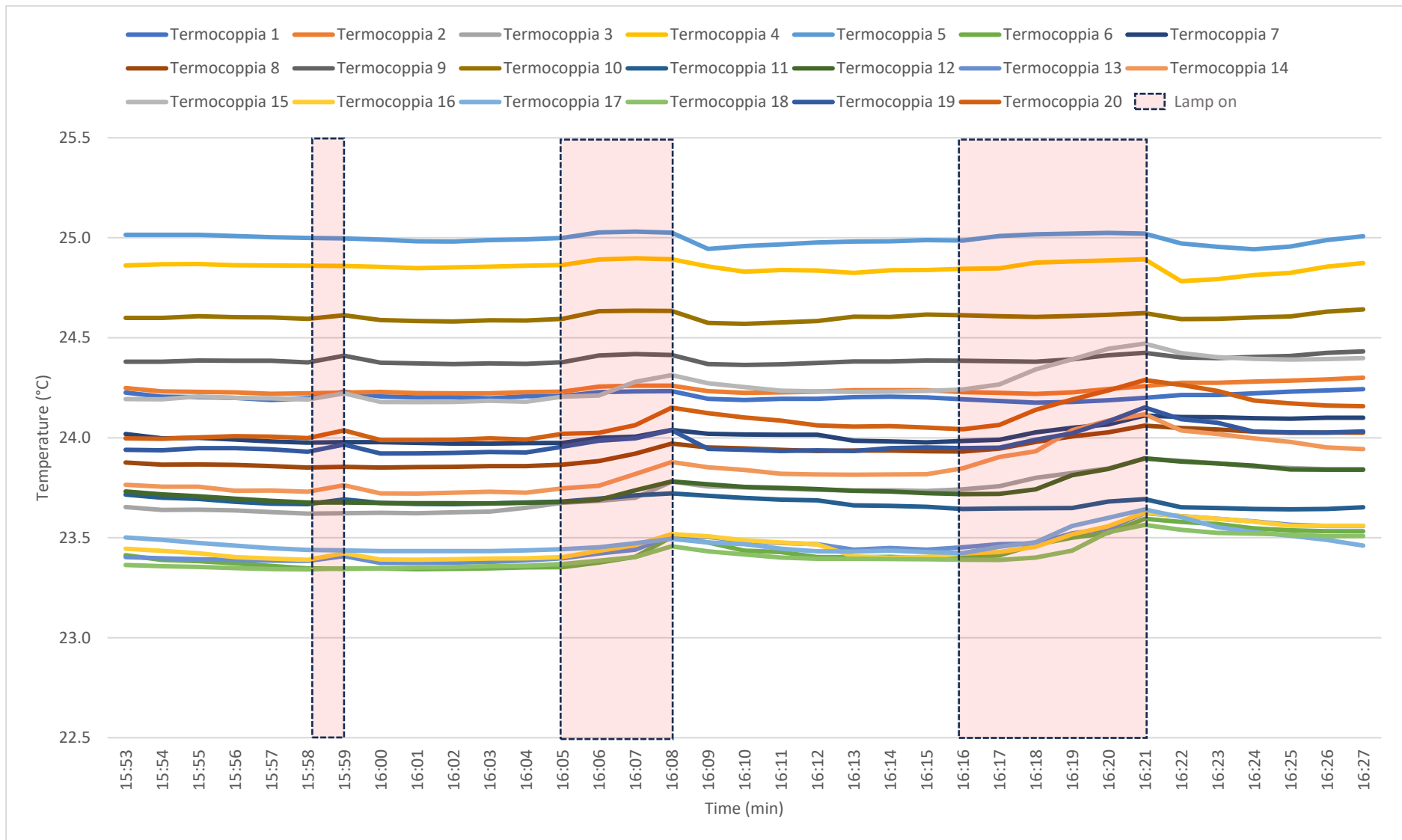


Grafico 36: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 4

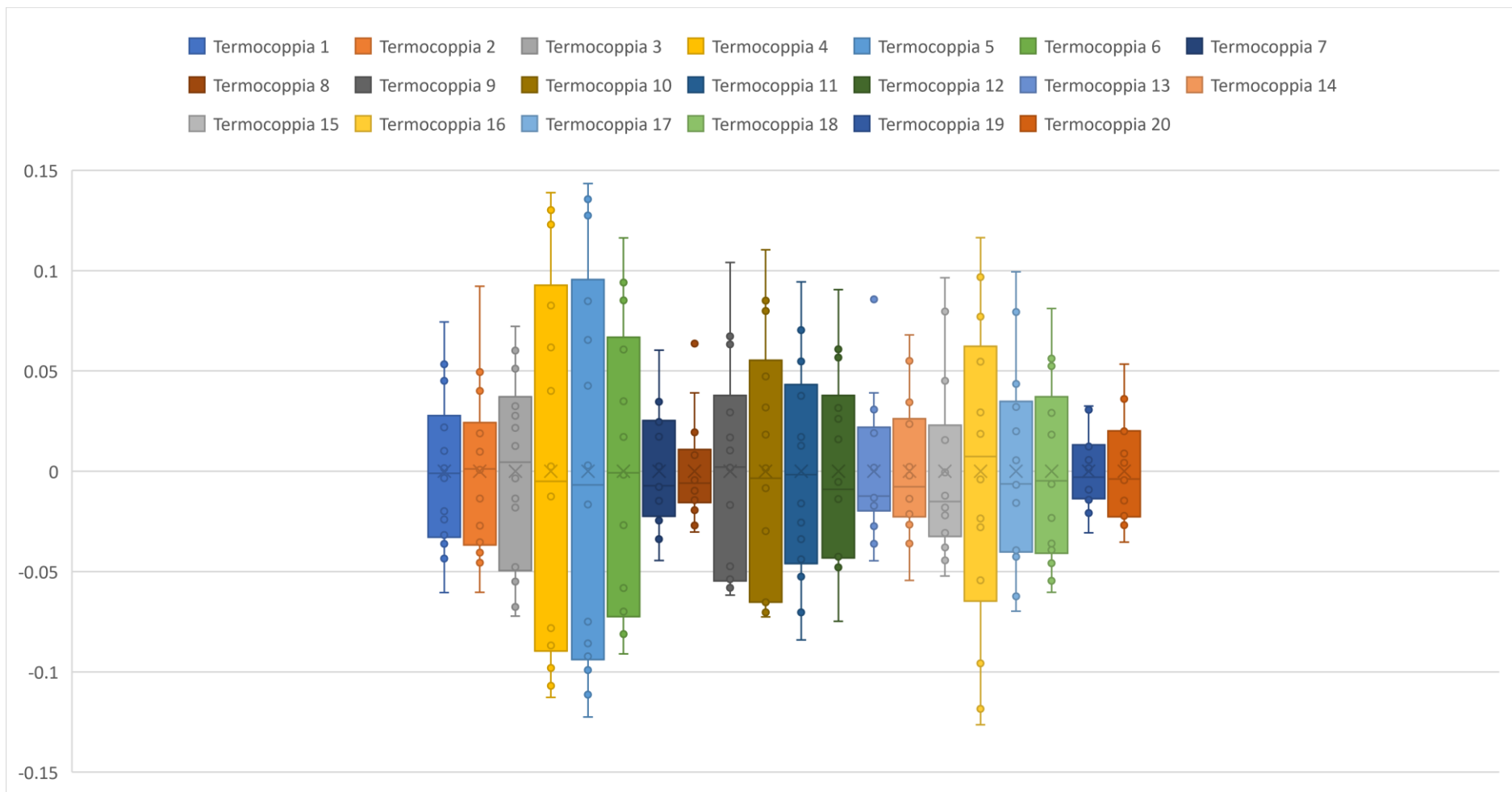


Grafico 37: Box Plot accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 1

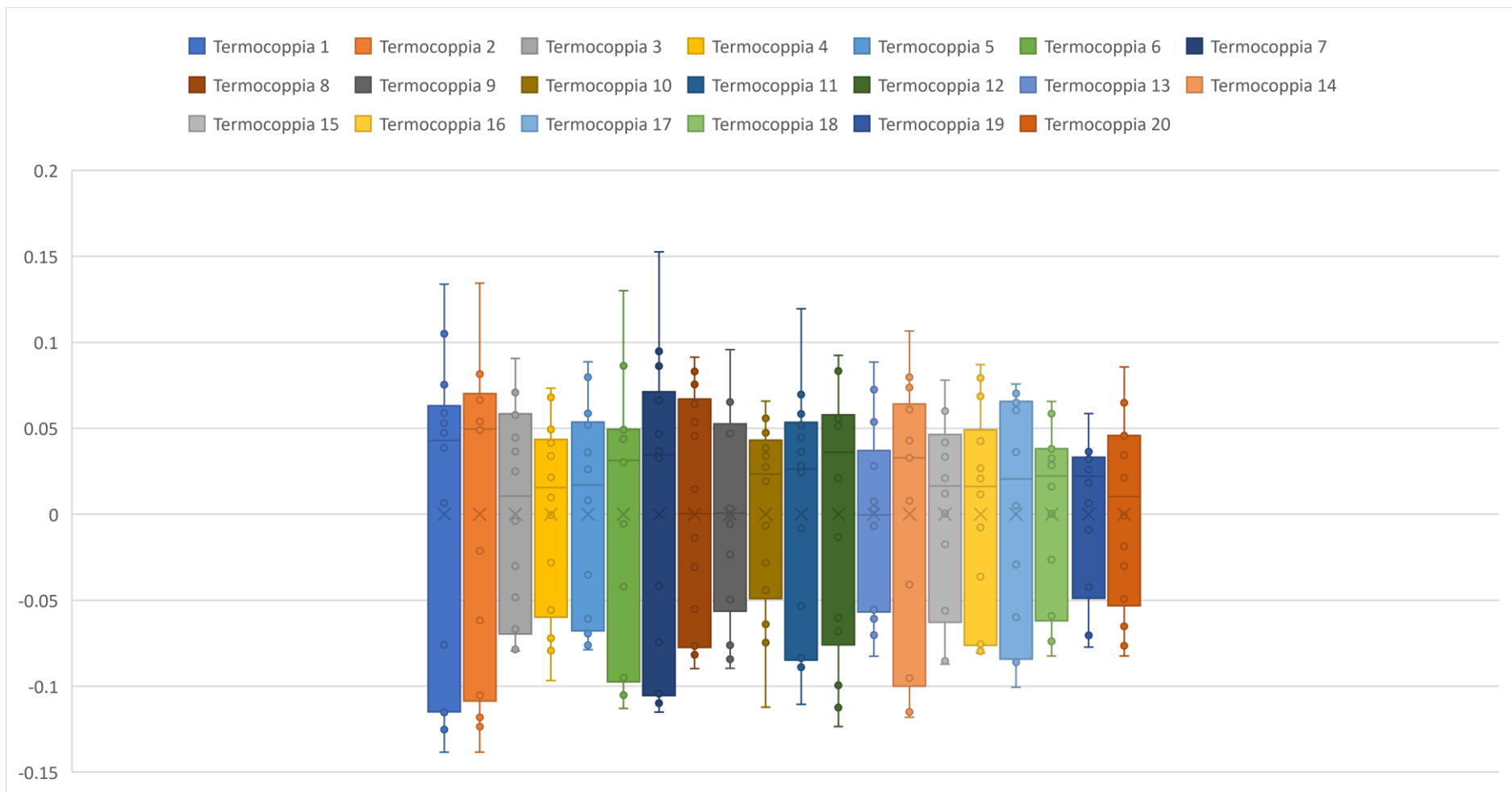


Grafico 38: Box Plot accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 2

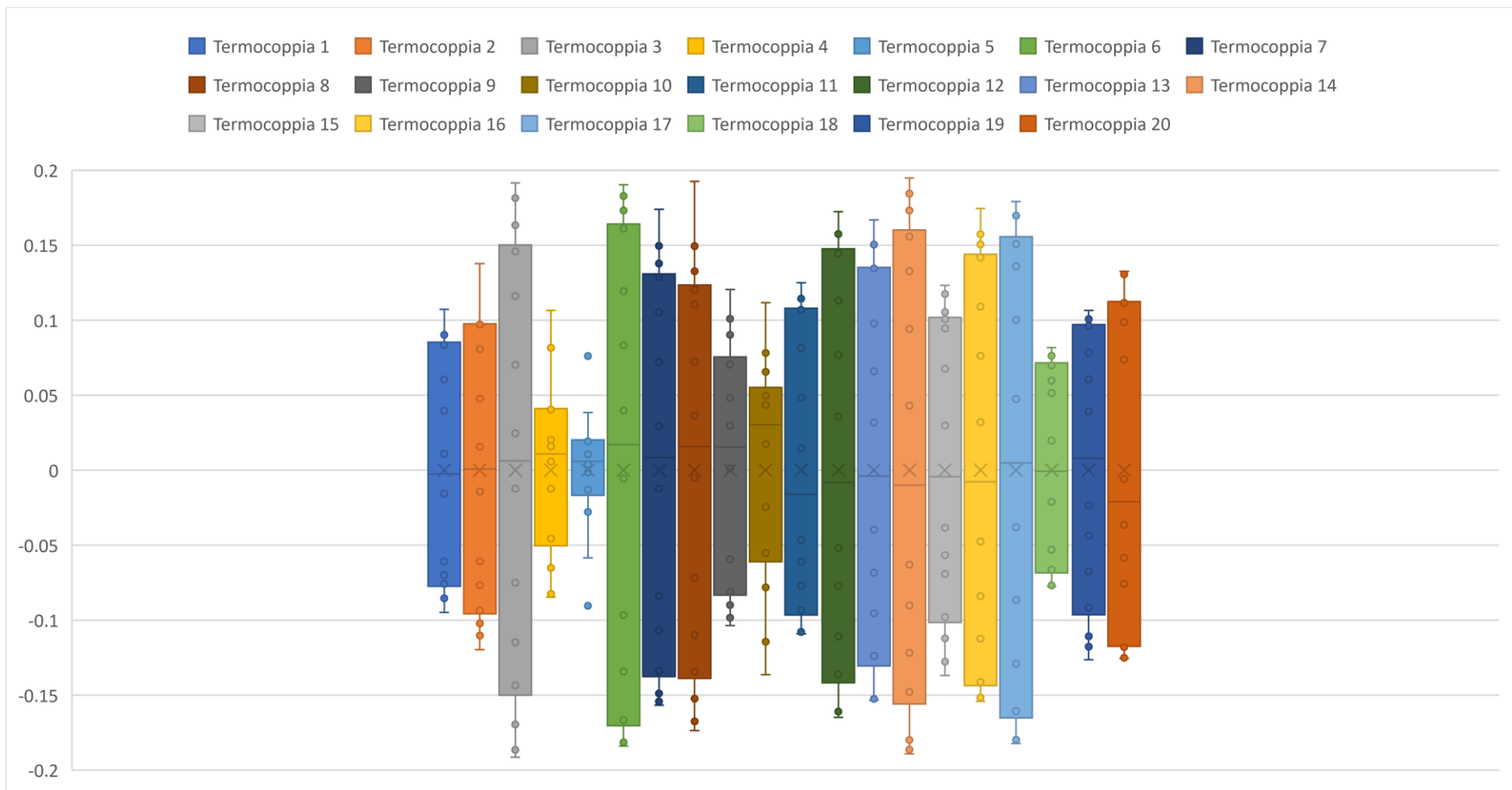


Grafico 39: Box Plot accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 3

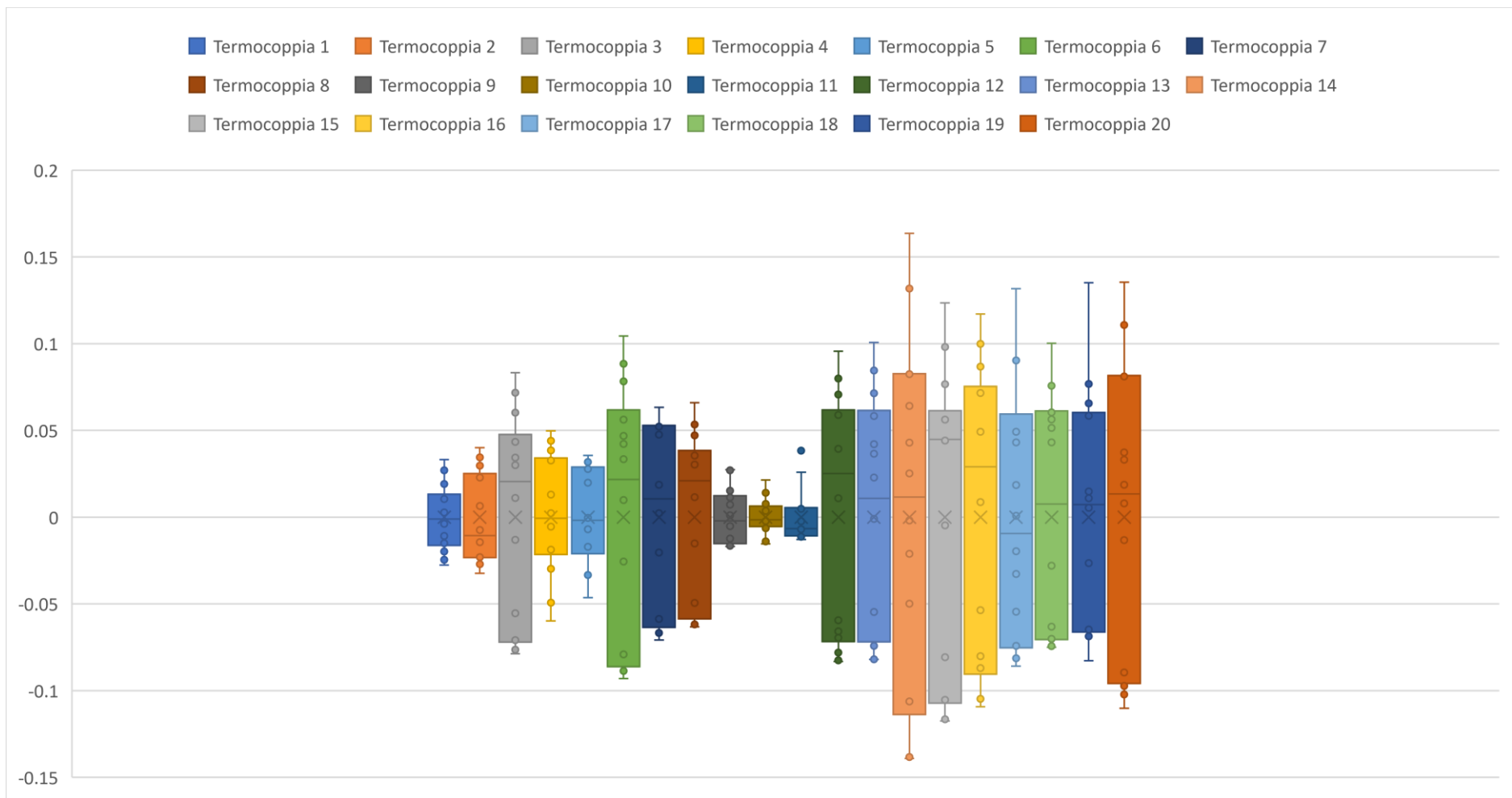
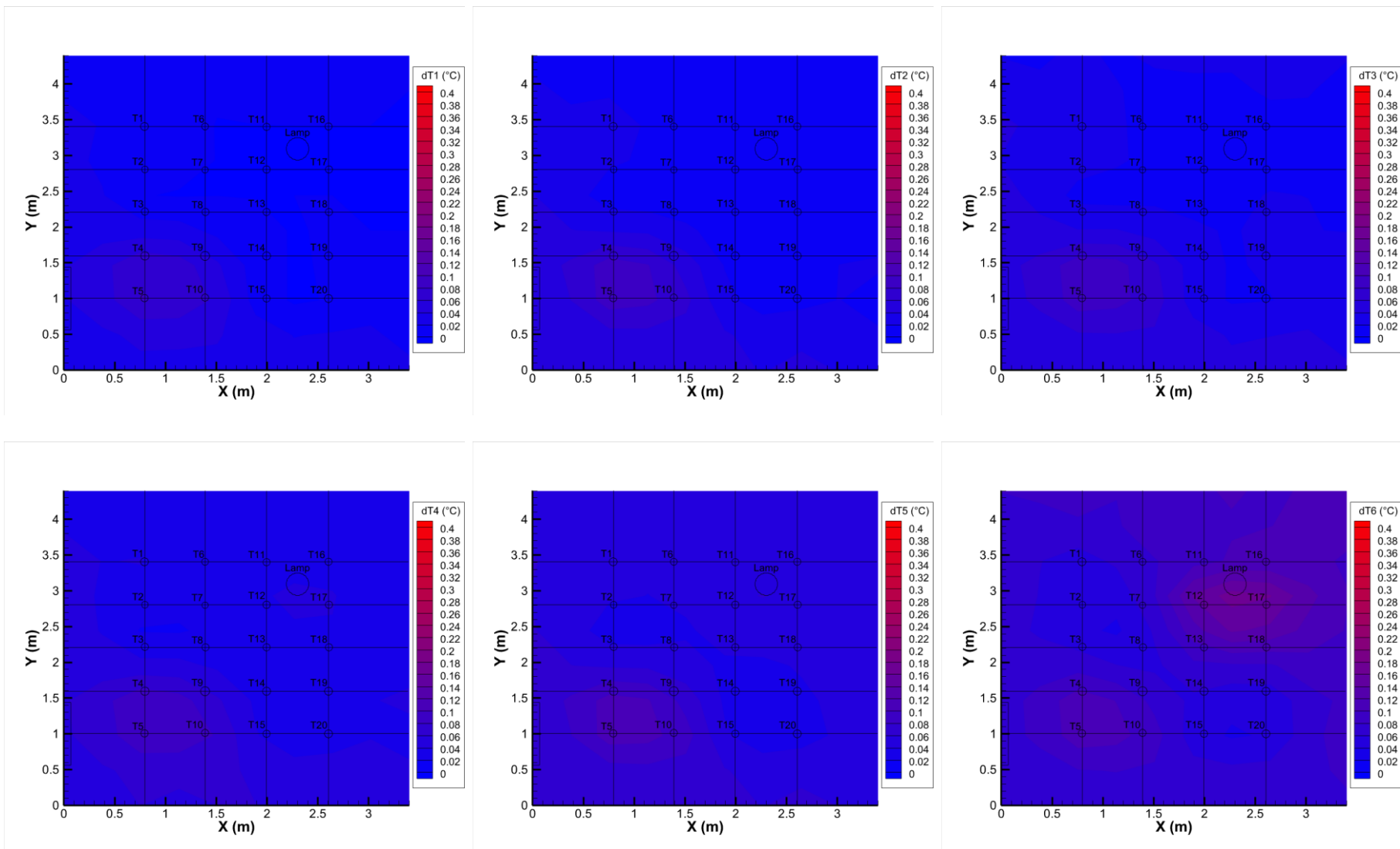
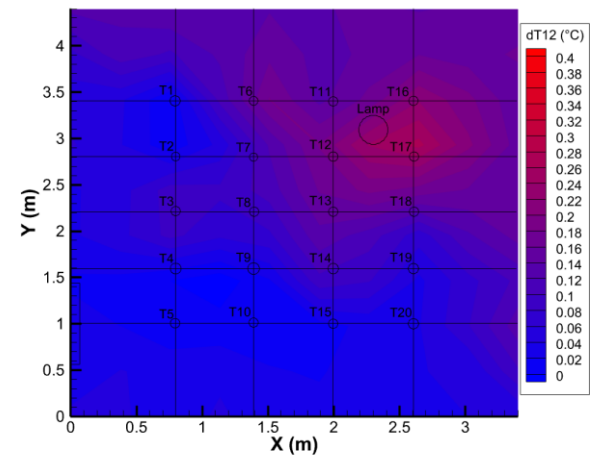
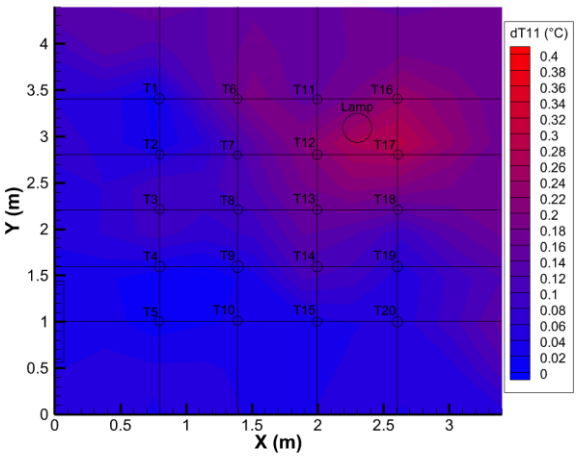
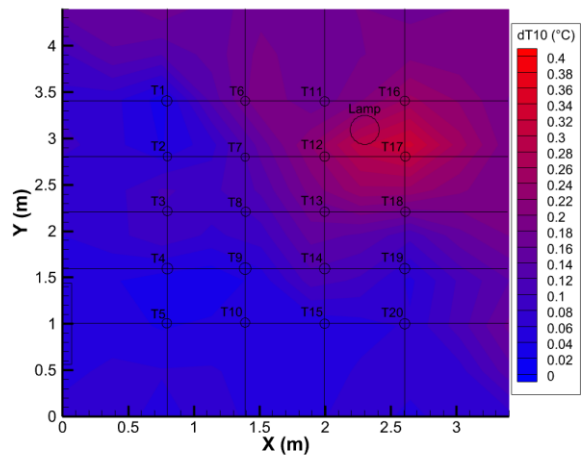
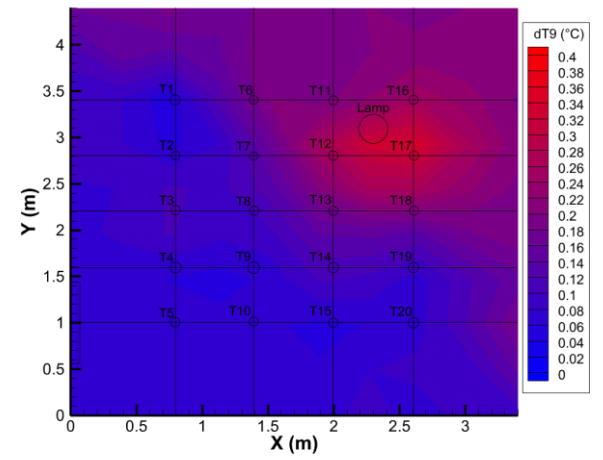
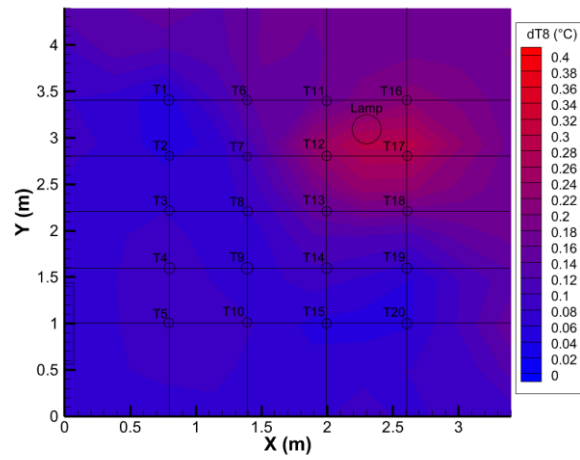
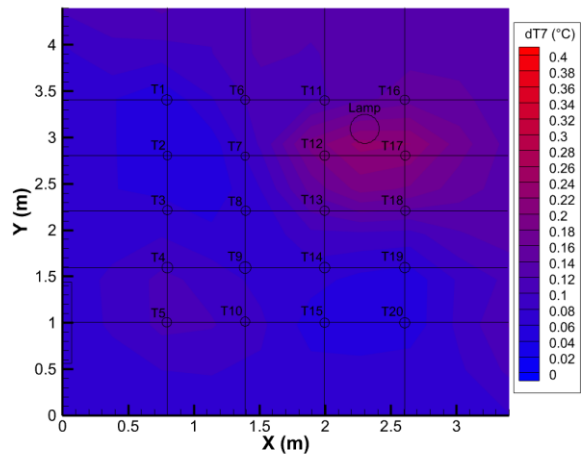


Grafico 40: Box Plot accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 4

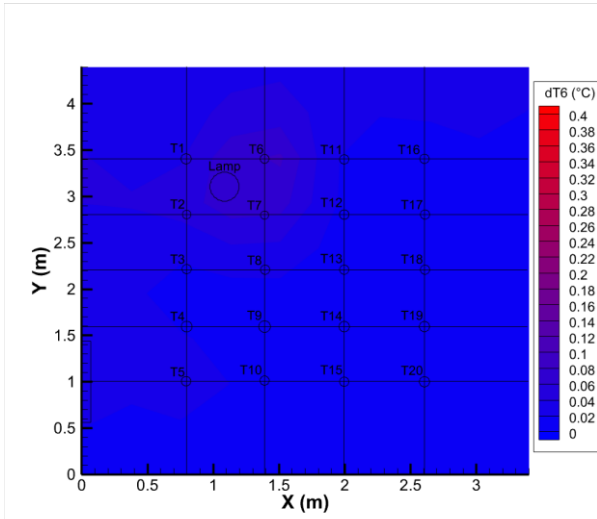
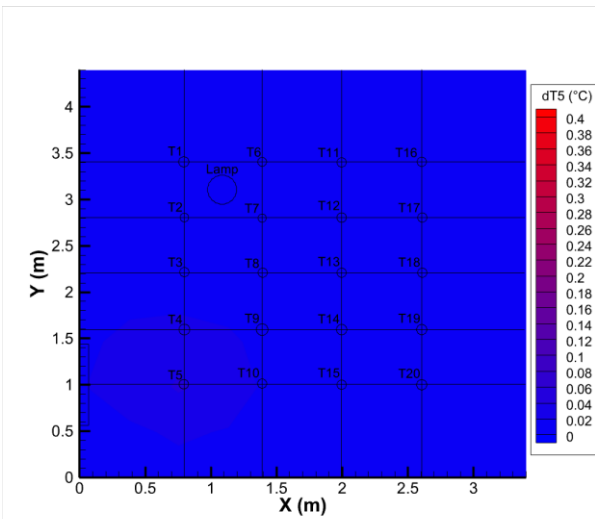
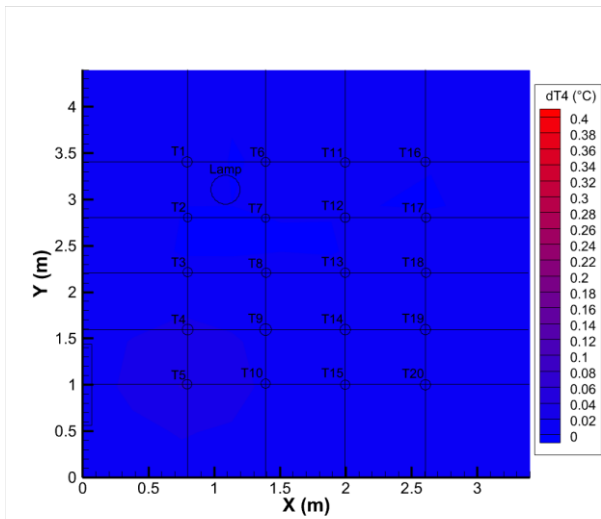
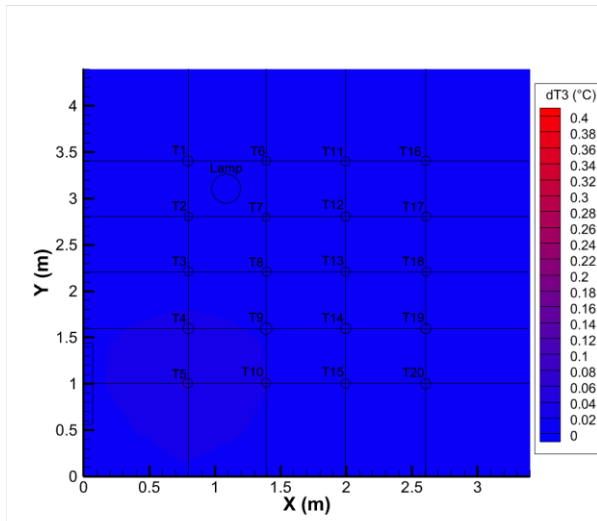
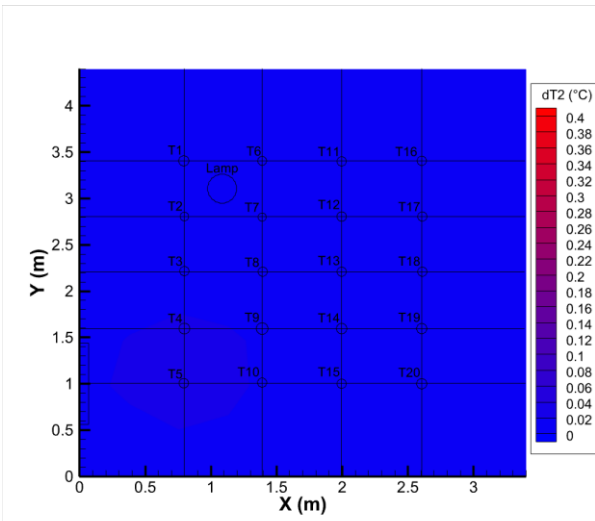
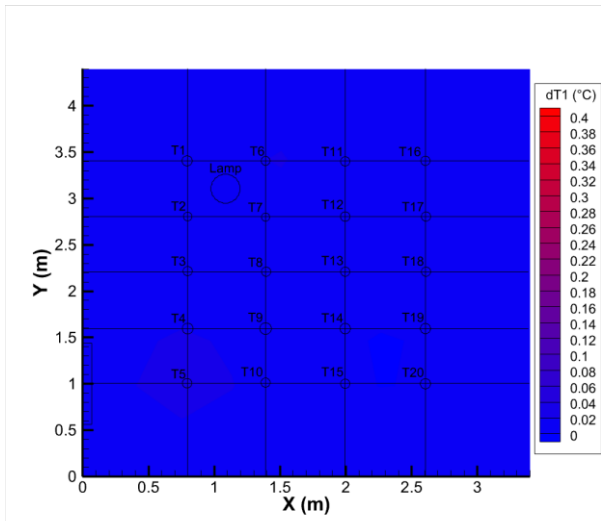
Appendice 3

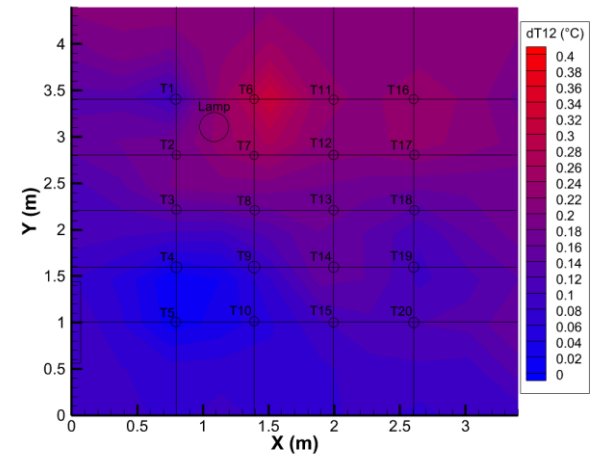
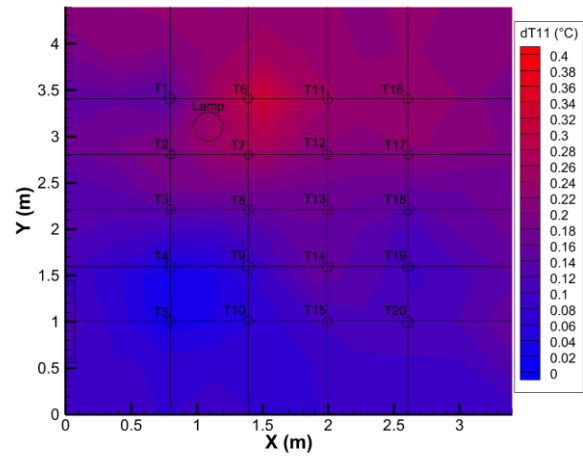
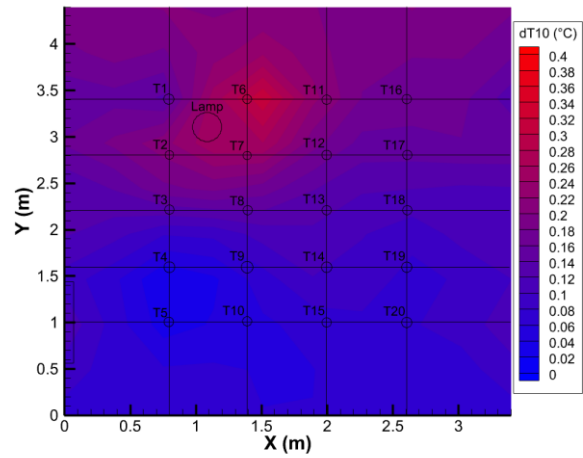
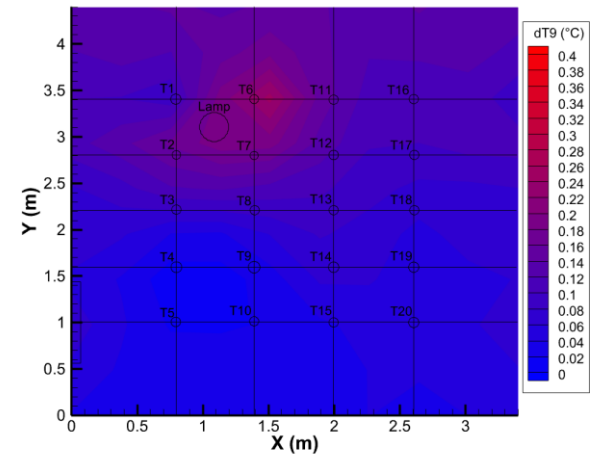
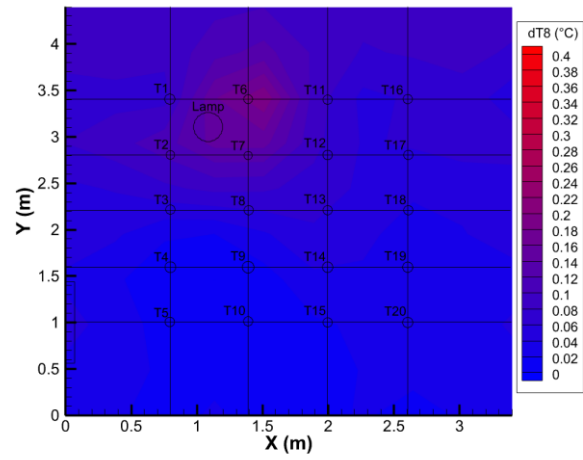
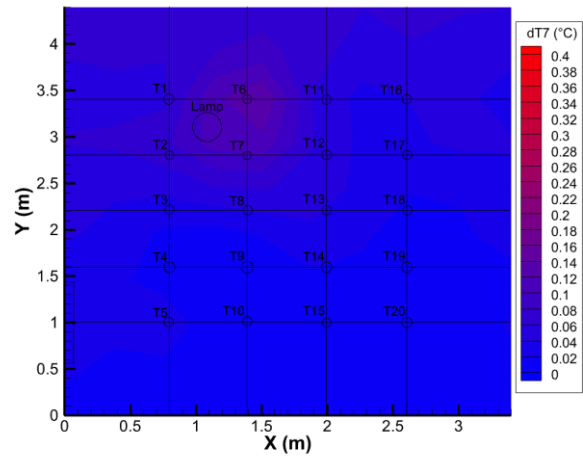
1) Prove accensione lampada per 5 minuti, zona 1



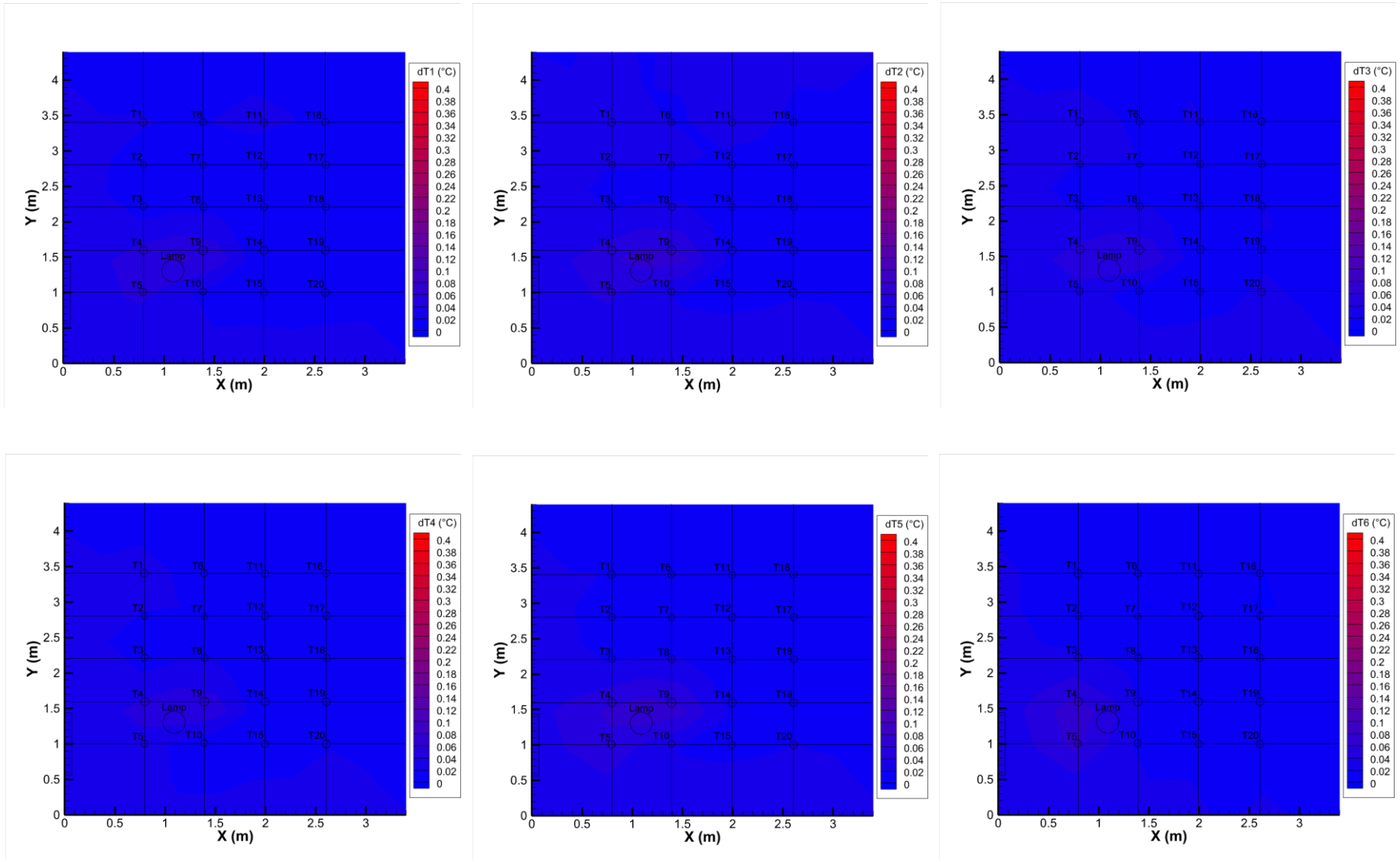


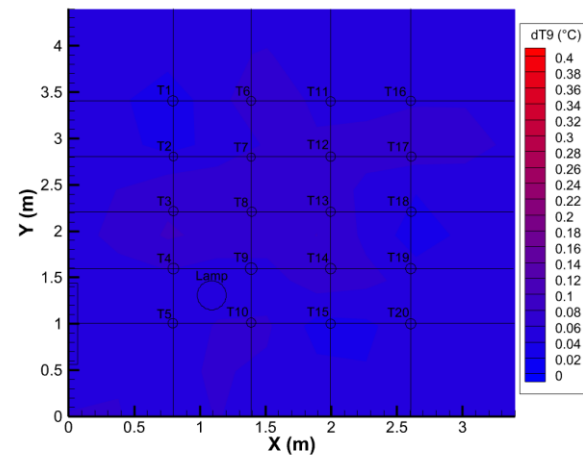
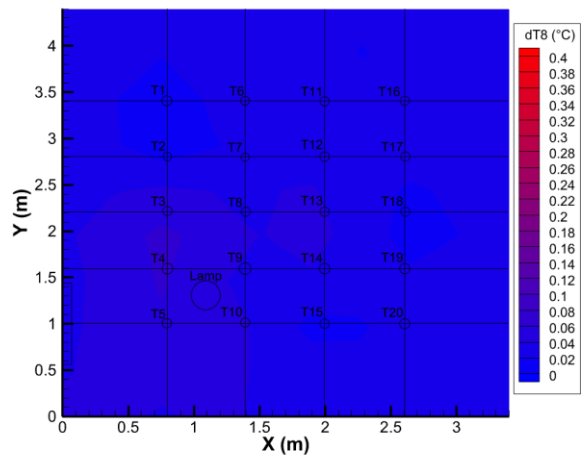
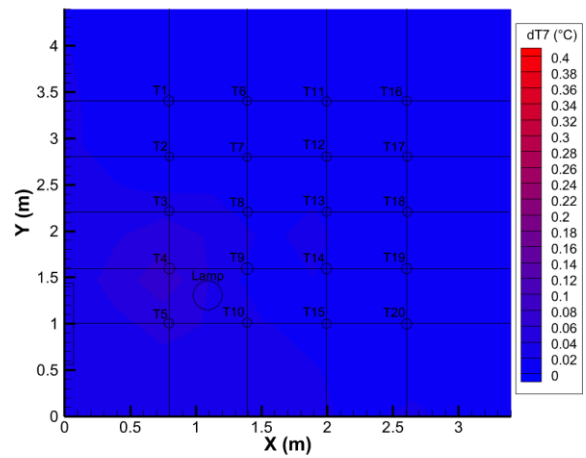
2) Prove accensione lampada per 5 minuti, zona 2



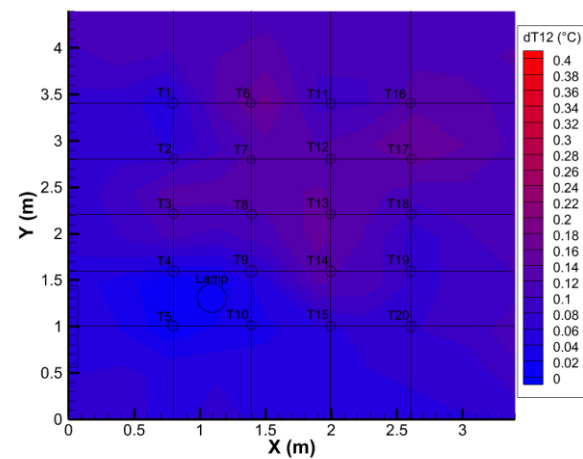
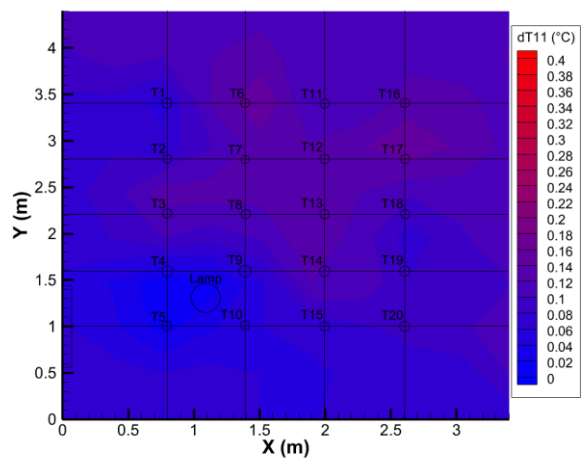
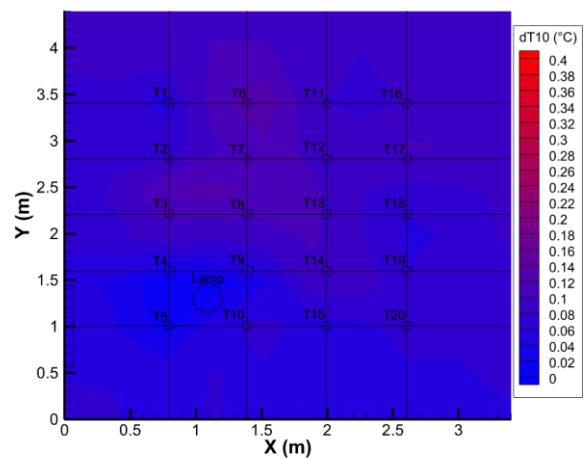


3) Prove accensione lampada per 5 minuti, zona 3





C



4) Prove accensione lampada per 5 minuti, zona 4

