



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**SVILUPPO DI UN SISTEMA SMART DI CONTROSOFFITTO PER
COMFORT MULTIDOMINIO: OTTIMIZZAZIONE DELLE
PRESTAZIONI ACUSTICHE**

**DEVELOPMENT OF A SMART CEILING SYSTEM FOR
MULTIDOMAIN COMFORT: ACOUSTIC PERFORMANCE
OPTIMIZATION**

Relatore:

Prof.ssa Ing. Francesca Stazi

Correlatori:

Prof. Ing. Costanzo Di Perna

Dott.ssa Serena Summa

Tesi di Laurea di:

Leonardo Ercoli

A.A. 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 di comfort acustico.

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.....	5
2. Obiettivi.....	8
3. Metodi e strumenti.....	9
3.1 Caso studio (Design della Test-Room).....	9
3.2 Tipologie pannelli.....	12
3.3 Metodo di rilevazione della presenza.....	14
3.3.1 Strumenti di misura.....	19
3.4 Metodo di controllo termico.....	20
3.4.1 Strumenti di misura.....	24
3.5 Metodi di misurazione acustica.....	25
3.5.1 Tempo di riverberazione.....	28
3.5.2 Indice di Chiarezza C50.....	32
3.5.3. Strumenti di misura.....	34
4. Risultati.....	35
4.1 Risultati prove di rilevazione della presenza.....	35
4.1.1 Prova 1-5-10 minuti.....	36
4.1.2 Prova 1-3-5 minuti.....	40
4.2 Risultati prove acustiche.....	43
4.2.1 Prova acustica senza controsoffitto.....	43
4.2.2 Prova acustica pannelli standard.....	50
4.2.3 Prova acustica pannelli innovativi.....	56
5. Discussione.....	62
5.1 Efficacia della rilevazione della presenza.....	62
5.2 Efficienza acustica dei pannelli innovativi.....	64
6. Conclusioni.....	66

Bibliografia.....	67
Appendice 1.....	70
Appendice 2.....	78
Appendice 3.....	86

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 ($24,5 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), Classe B ($24,5 \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$), Classe C ($24,5 \pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$) [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 $54 \pm 5 \%$ 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 $2 \text{ }^\circ\text{C}$, 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, rappresentata in 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.

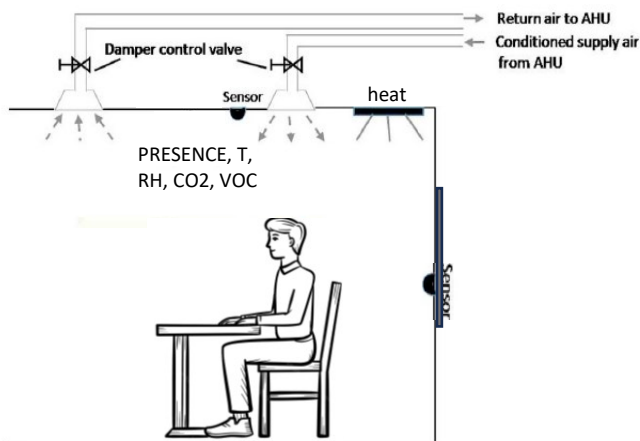


Figura 1: Esempio soluzioni controsoffitto

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 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 $14,96 \text{ m}^2$. 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.

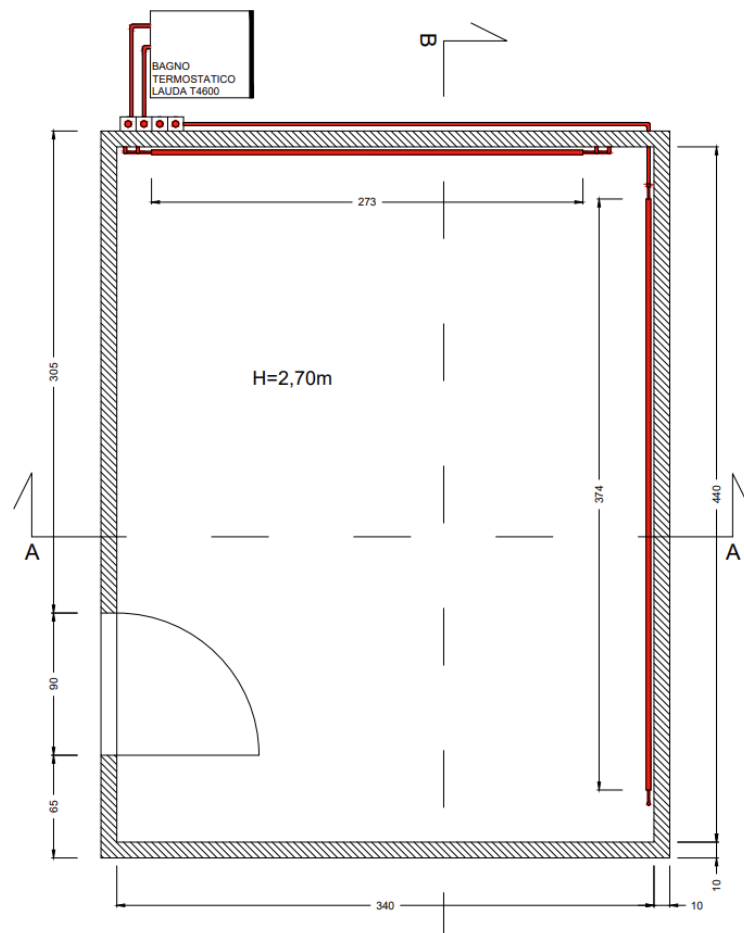


Figura 3: Pianta Test Room

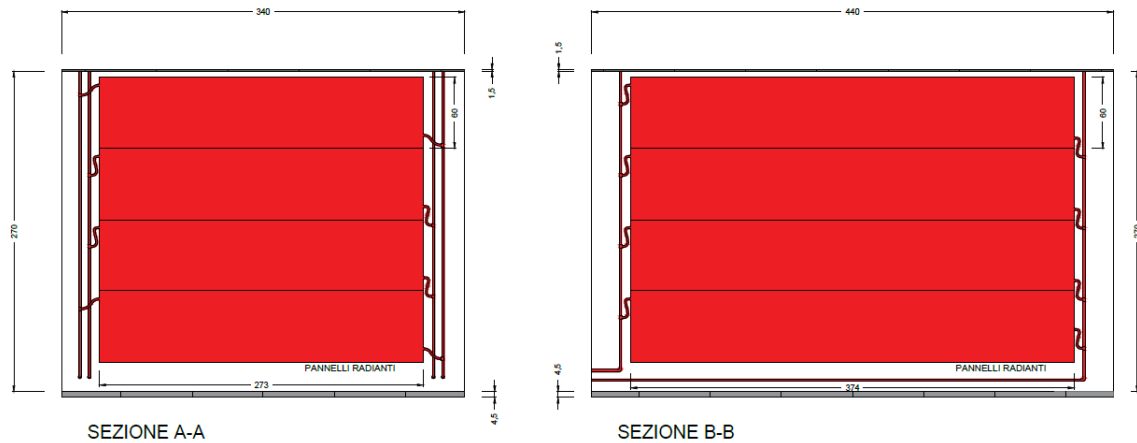


Figura 4: Sezioni della Test Room

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 Tipologie pannelli

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: Pannelli Standard

La seconda tipologia (Figura 7), invece, è costituita da pannelli innovativi, realizzati con un tessuto in mediafiltrane in polistirene, ovvero un foglio composto da carboni attivi (Figura 6), 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 7: Pannello Innovativo



Figura 6: Tessuto Pannello

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, 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, accordo con la norma UNI EN ISO 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: Caratteristiche Pannello Innovativo

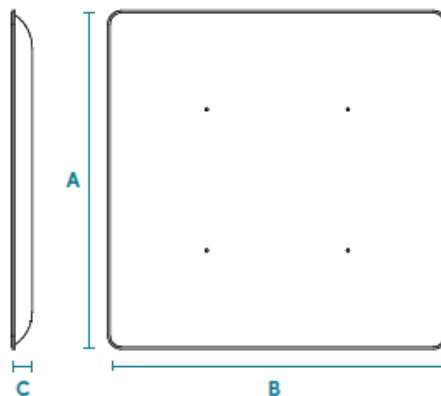


Figura 8: Dimensioni Pannello Innovativo

3.3 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 (Figura 9,10). 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.

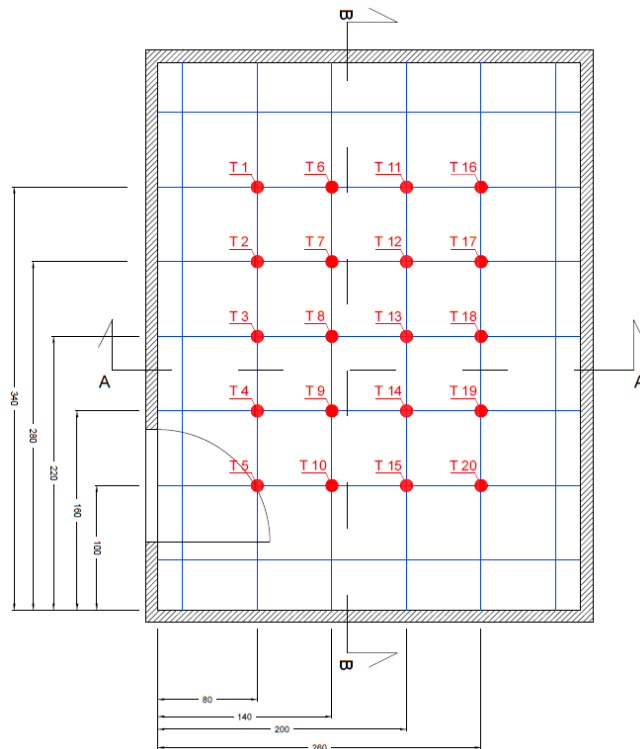


Figura 9: Pianta posizioni termocoppie Test Room

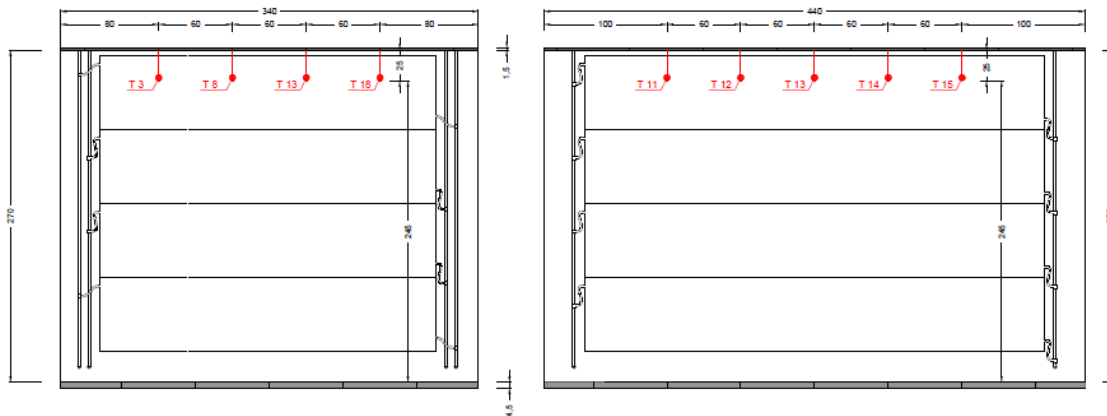


Figura 10: Sezioni posizioni termocoppie Test Room

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 rita 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 15): 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 16). 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 Termocoppie T

Il primo cablaggio è stato quello tra le singole termocoppie e il punto di zero (Figura 12). Questo strumento è stato poi connesso con il modulo di acquisizione dati HP 34901A (Figura13) che permette di effettuare la lettura tramite il collegamento di quest'ultimo al voltmetro Aligent 34420A.

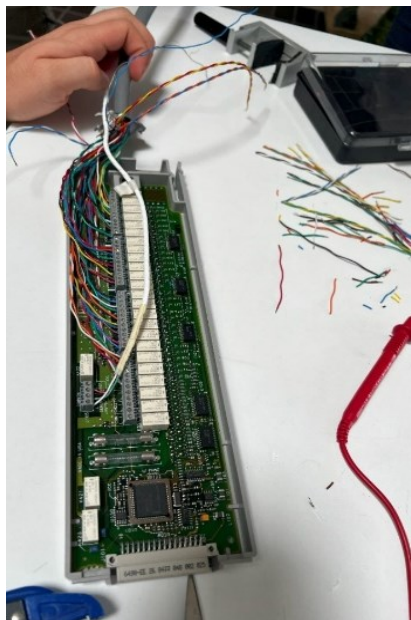


Figura 13: Cablaggio modulo HP 34901A

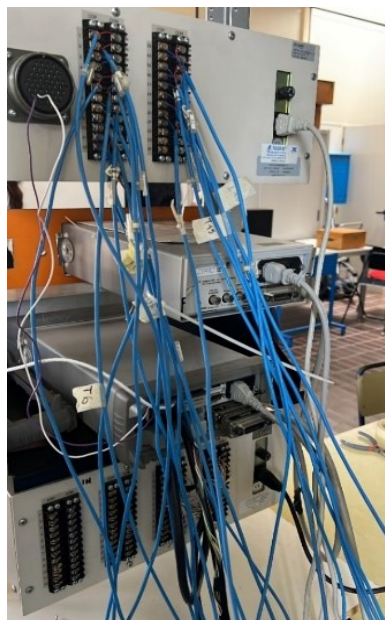


Figura 12: Cablaggio HP34901A

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 installati

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.

3.3.1 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

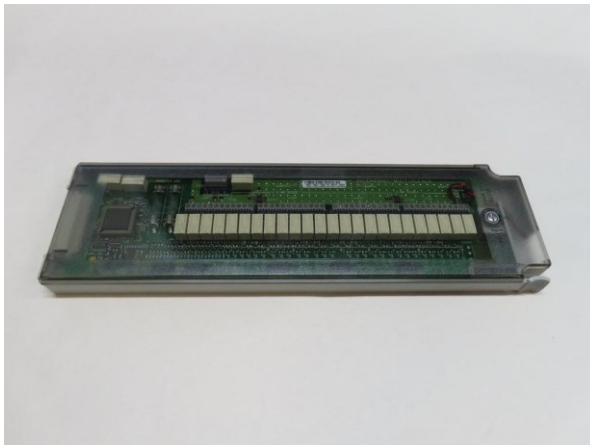


Figura 16: Scheda modulo di acquisizione dati HP 34901A



Figura 17: K170 Ice Point Reference

3.4 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.

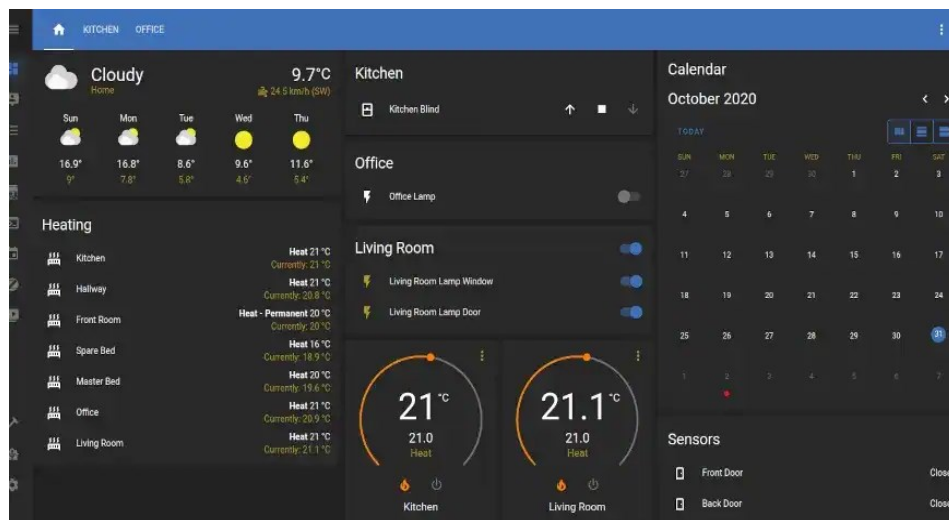


Figura 18: Interfaccia software Home Assistant

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 (Figura22): 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.

3.4.1 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 con i dispositivi e le 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	-
	°C	0° a 50°C	±0,21°C from 0° to 50 °C
	% RH	1% a 90%	±2%

Tabella 3: Caratteristiche dispositivi utilizzati

3.5 Metodi di misurazione acustica

Tra i diversi requisiti essenziali negli edifici scolastici, quelli legati all'acustica rivestono un ruolo cruciale. Questo perché i rumori generati all'interno di un ambiente, come quelli prodotti da un sistema di ventilazione meccanica controllata, contribuiscono al livello di rumore di fondo o rumore residuo. Questi rumori possono coprire o disturbare i suoni prodotti da un oratore, creando un'esperienza uditiva sgradevole e fastidiosa, portando a un generale disagio per quanto riguarda le condizioni acustiche. La presenza di una eccessiva riverberazione e l'elevata rumorosità di fondo riducono l'intelligibilità della parola, intesa come percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un uditore rispetto alla totalità delle parole o frasi pronunciate da un oratore. I metodi di valutazione si determinano dagli indici di intelligibilità ottenuti dalla misura o dal calcolo di parametri connessi alla riverberazione. Le condizioni ottimali di intelligibilità sono definibili in relazione alla destinazione d'uso dell'ambiente e dunque dall'attività svolta dagli occupanti.

Le caratteristiche acustiche interne degli ambienti scolastici vengono definite dalla norma UNI 11532-2:2020 [17] che fornisce delle indicazioni per ottenere ambienti acusticamente idonei all'attività didattica, sia per il corpo docente che per gli alunni.

La comprensione del parlato è un requisito di primaria importanza e per questo motivo i fattori che sono stati valutati sono, il T60 (tempo di riverberazione) e il C50 (Chiarezza), poiché, per le caratteristiche dimensionali della test room, sono i due parametri richiesti da normativa.

Per la caratterizzazione acustica della test room in oggetto, è stata effettuata, in ottemperanza alle normative tecniche vigenti, la progettazione e la conduzione di una serie di misure fonometriche al fine di valutare i seguenti descrittori acustici: T60, C50.

Le modalità di misurazione e di valutazione, per quanto riguarda i due descrittori, sono descritte nella UNI EN ISO 3382-2 [18]

Per conseguire un'adeguata copertura dell'ambiente, sono state individuate tre posizioni di misura, uniformemente distribuite sull'intera area della stanza, poste ad una distanza compresa tra i 2 m e i 2,5 m l'una dall'altra.

Nella Figura 24 si identificano i punti di misura utilizzati nella test-room.

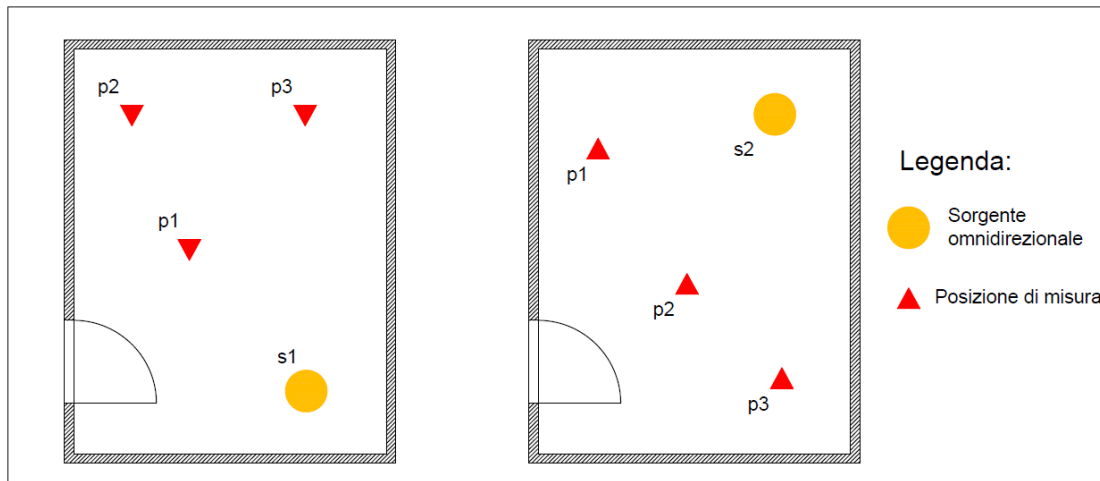


Figura 24: Punti di misura utilizzati

Il microfono è stato posizionato ad una distanza minima di circa 0,5 m dalle pareti e ad 1,2 m dal pavimento.

Le acquisizioni fatte per ogni posizione sono state eseguite con, pc, software Dirac, Amplificatore B&K tipo ZC-0032 (Figura 26), utilizzando il “metodo della risposta integrata all’impulso” UNI EN ISO 3382-2 [18] con sorgente sonora dodecaedrica omnidirezionale B&K tipo OmniPower Sound Source 4292-L (Figura 25).



Figura 26: Strumentazione per acquisizione



Figura 25: Posizione S2 sorgente, p3 misura

Tale metodo consente di analizzare il decadimento del livello della pressione sonora in funzione del tempo in un punto di un ambiente dopo la cessazione della sorgente sonora, mediante integrazione inversa delle risposte all'impulso quadro.

La risposta all'impulso è il diagramma (Figura 27), nel dominio del tempo, della pressione sonora ricevuta in un ambiente quale risultato di un eccitamento dell'ambiente stesso da parte di una funzione delta di Dirac.

La stanza è considerata come una black box nella quale entra un input ed esce un output:

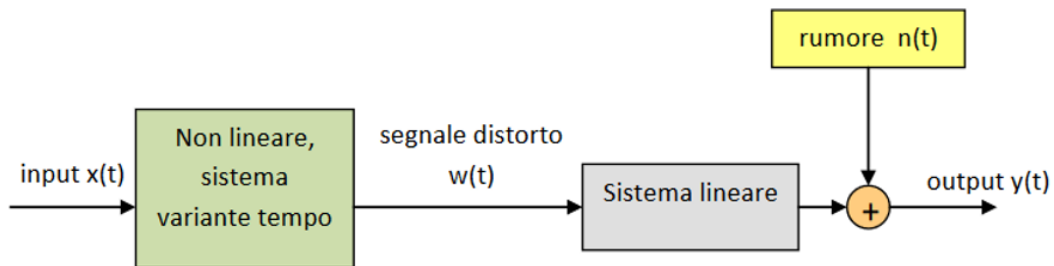


Figura 27: Schema della stanza, risposta ad impulso

Un segnale di ingresso $x(t)$ non si propaga direttamente nell'ambiente, ma passa attraverso un altoparlante che distorce il segnale in modo non lineare. La stanza viene "disturbata" non con un input $x(t)$, ma con un segnale $w(t)$ già distorto. La propagazione acustica nella stanza è un fenomeno generalmente lineare, la cui risposta impulsiva lineare è detta $h(t)$. Il rumore $n(t)$ si sovrappone sul segnale output in uscita $y(t)$.

3.5.1 Tempo di riverberazione

In accordo con la norma UNI EN ISO 3382-2 [18] il tempo di riverberazione si determina a partire dalla curva di decadimento del livello di pressione sonora in funzione del tempo, in un punto dell'ambiente, dopo lo spegnimento di una sorgente sonora. Questo decadimento può essere misurato dopo l'interruzione effettiva di una sorgente stazionaria (rumore a larga banda o a banda limitata) o derivato dall'integrazione all'indietro (a partire dalla fine) del quadrato della risposta all'impulso.

La norma definisce il tempo di riverberazione come il tempo, in secondi, necessario affinché il livello di pressione sonora diminuisca di 60 dB ad un tasso di decadimento (decibel al secondo) indicato dalla regressione lineare dei minimi quadrati della curva di decadimento, su un intervallo da - 5 dB e - 35 dB al di sotto del livello iniziale. In questo caso il simbolo utilizzato per indicare il tempo di riverberazione è T30. Tuttavia, qualora non sia disponibile un decadimento di 30 dB per la presenza di un eccessivo livello del rumore di fondo, è possibile far riferimento all'intervallo da - 5 dB a - 25 dB del decadimento del suono. In questo caso il simbolo utilizzato per indicare il tempo di riverberazione è T20.

In Figura 28 è rappresentata la retta di regressione riferita ad un decadimento di 30 dB e il tempo corrispondente letto sull'asse delle ascisse. Per ottenere il T30, l'intervallo temporale (t_2-t_1) è moltiplicato per 2 per rapportarlo ad un decadimento di 60 dB, secondo la definizione convenzionale del tempo di riverberazione.

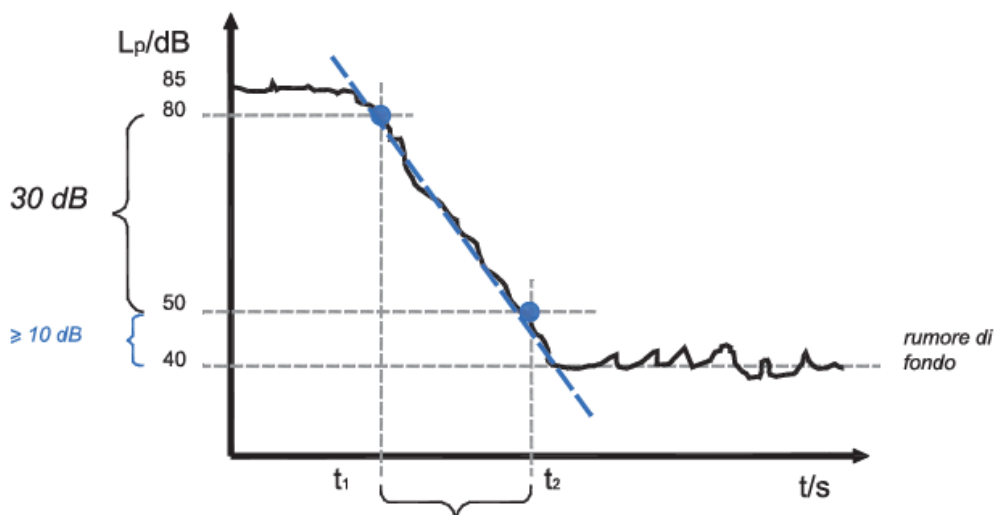


Figura 28: Determinazione del tempo di riverberazione dalla curva di decadimento

In questo caso l'intervallo considerato al di sotto del livello iniziale è $-5 \div -35$ dB. L'intervallo temporale (t_2-t_1) è moltiplicato per 2 per rapportarlo ad un decadimento di 60 dB, secondo la definizione del tempo di riverberazione.

Wallace C. Sabine determinò la legge che lega il tempo di riverberazione alle caratteristiche dell'ambiente, quali il volume e l'area di assorbimento acustico equivalente. Individuò tale relazione, nota oggi come la "formula di Sabine", nel tentativo di comprendere cosa rendesse l'acustica della Fogg Lecture Hall non adatta alla sua destinazione d'uso rispetto ad altri ambienti la cui acustica era invece molto rinomata.

La formula di Sabine si esprime come (Formula 3.1):

$$T = 0,16 \frac{V}{A_{Tot}} \quad (s), \quad (3.1)$$

dove:

V = volume dell'ambiente espresso in metri cubi;

A_{Tot} = area di assorbimento acustico equivalente, espressa in metri quadrati.

Numerosi studi hanno indicato che il tempo di riverberazione ottimale in aule scolastiche di volumetria compresa fra 100 e 400 m³, in condizioni di aula occupata, è pari a 0,4-0,5 s nella regione delle medie frequenze.

In Italia, la norma di riferimento sull'edilizia scolastica pubblica è la recente norma tecnica UNI 11532-2:2020 [17] che è citata nel DM dell'11ottobre 2017 in tema di Criteri Ambientali Minimi (CAM) [19].

La UNI 11532-2 rimanda alla UNI 12354-6 [20] per il calcolo in fase previsionale del tempo di riverberazione.

Per quanto riguarda i limiti di riferimento, essa considera un intervallo di conformità, determinato a partire dal calcolo del tempo di riverberazione ottimale T_{ott} in relazione all'attività cui l'ambiente è destinato tabella 4, mediante le formule riportate in tabella 5 e indica dei valori di indirizzo che ne specificano l'andamento in frequenza in Tabella 6.

Categoria	Attività in ambiente
A1	Musica
A2	Parlato /conferenza
A3	Lezione/comunicazione come parlato/ conferenza (aule grandi) interazione insegnante studente
A4	Lezione/comunicazione, incluse aule speciali
A5	Sport
A6	Aree e spazi non destinati all'apprendimento e biblioteche

Tabella 4: Prospetto 1 della UNI 11532-2, categorie degli ambienti in relazione all'attività

Categoria	Ambiente	T_{ott}	Volume
A1	Occupato all' 80%	$T_{ott,A1} = (0,45\log V + 0,07)$	$30 \text{ m}^3 \leq V < 1000 \text{ m}^3$
A2		$T_{ott,A2} = (0,37\log V - 0,14)$	$50 \text{ m}^3 \leq V < 5000 \text{ m}^3$
A3		$T_{ott,A3} = (0,32\log V - 0,17)$	$30 \text{ m}^3 \leq V < 5000 \text{ m}^3$
A4		$T_{ott,A4} = (0,26\log V - 0,14)$	$30 \text{ m}^3 \leq V < 500 \text{ m}^3$
A5	Non occupato	$T_{ott,A5} = (0,75\log V - 1,00)$ $T_{ott,A5} = 2,00$	$200 \text{ m}^3 \leq V < 10000 \text{ m}^3$ $V \geq 10000 \text{ m}^3$

Tabella 5: Prospetto 6 della Uni 11532-2. Formule di calcolo T_{ott} per le categorie da A1 a A5

Limite	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Superiore	$1,45 \cdot T_{ott}$	$1,20 \cdot T_{ott}$	$1,20 \cdot T_{ott}$	$1,20 \cdot T_{ott}$	$1,20 \cdot T_{ott}$	$1,20 \cdot T_{ott}$
Inferiore	$0,65 \cdot T_{ott}$	$0,80 \cdot T_{ott}$	$0,80 \cdot T_{ott}$	$0,80 \cdot T_{ott}$	$0,80 \cdot T_{ott}$	$0,65 \cdot T_{ott}$

Tabella 6: Andamento in frequenza del tempo di riverberazione ottimale

Per la destinazione d'uso A5 si considerano soltanto i valori di indirizzo delle bande d'ottava tra 250 Hz e 2000 Hz.

Il valore del tempo di riverberazione di progetto dovrà essere compreso nell'intervallo di conformità riportato nella Figura 29:

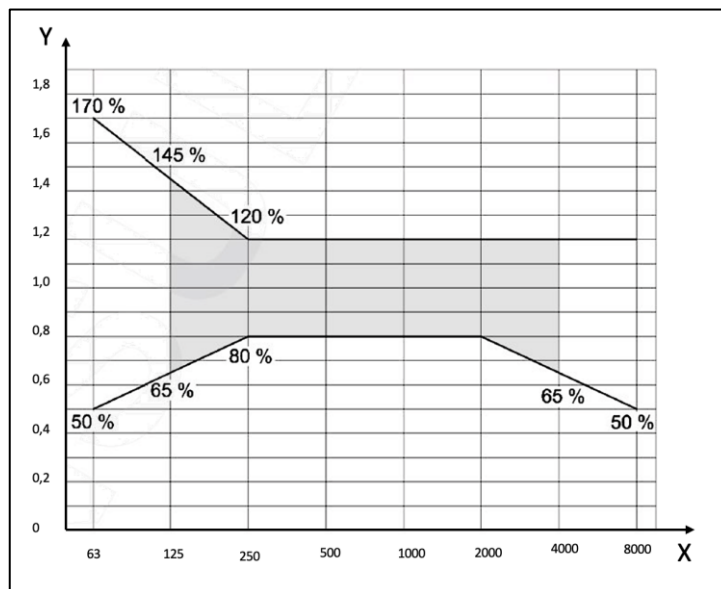


Figura 29: Intervallo di conformità del valore del tempo di riverberazione di progetto

Dove:

X_f = frequenza (Hz)

$Y = T/T_{ott}$ tempo di riverberazione dipendente dalla frequenza T rispetto al tempo di riverberazione desiderato T_{ott} (adimensionale).

La normativa specifica che l'intervallo di conformità si riferisce a un'occupazione convenzionale dell'ambiente pari all'80% per le categorie A1, A2, A3, A4 e, per permettere il confronto con i limiti di riferimento, indica l'equazione riportata qui sotto, per la conversione tra i valori allo stato arredato e non occupato (T_{mean}), come al momento della verifica secondo la UNI EN ISO 3382-2, e i valori allo stato arredato e occupato (T_{occ})(3.2):

$$T_{occ} = \frac{T_{mean}}{1 + \frac{\Delta A_{pers} T_{mean}}{0,16V}} \quad (s), \quad (3.2)$$

3.5.2 Indice di Chiarezza C50

La Chiarezza C50 si utilizza per valutare l'intelligibilità in ambienti non rumorosi. In accordo alla UNI EN ISO 3382-1 [21], lo C50 è definito come il rapporto tra l'energia sonora che giunge all'ascoltatore nei primi 50 ms e l'energia che giunge all'ascoltatore da 50 ms alla fine del decadimento del segnale.

L'indice C50 venne definito da Reimer e Muller ed è determinato mediante la Formula 3.3 seguente:

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(\tau) d\tau}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(\tau) d\tau} \quad (\text{dB}), \quad (3.3)$$

Dove $p(t)$ è la pressione sonora, intesa come risposta all'impulso emesso da una sorgente (con $t=0$ corrispondente all'istante in cui il suono diretto giunge nel punto di ricezione).

Nel rapporto che compare nella definizione dell'indice di chiarezza, a numeratore vi è l'energia utile che giunge all'ascoltatore entro i primi 50 ms e a denominatore l'energia dannosa che perviene negli istanti successivi.

La percezione di chiarezza è legata alla facoltà del cervello umano di combinare il suono diretto con le prime riflessioni in modo tale da permettere una precisa distinzione delle sillabe o delle note: in particolare, le riflessioni che arrivano entro 50 ms per il parlato vengono integrate dal cervello e contribuiscono a rinforzare l'intensità del suono e al miglioramento della percezione (effetto di precedenza o Haas). Le successive riflessioni in genere sono percepite come distinte e fastidiose e contribuiscono alla sensazione di eco.

I metodi previsionali per il calcolo di C50 sono indicati dalla norma UNI 11532-1 [22] e si distinguono in:

- calcolo approssimativo, in funzione del tempo di riverberazione T , con la Formula 3.4:

$$C_{50} = 10 \log \left[\exp\left(\frac{0,691}{T}\right) - 1 \right] \quad (\text{dB}), \quad (3.4)$$

oppure:

- calcolo puntuale, in funzione del volume dell'ambiente, V in metri cubi, del tempo di riverberazione, T in secondi, e della distanza sorgente-ricevitore, r in metri, secondo la teoria di Barron & Lee, con la Formula 3.5, in decibel:

$$C_{50}(r) = 10 \log \frac{\frac{100}{r^2} + \left(\frac{31200T}{V}\right) \left(1 - e^{-\frac{0,691}{T}}\right) e^{-\frac{0,04r}{T}}}{e^{-\frac{0,04r}{T}} \left(\frac{31200T}{V}\right) \left(e^{-\frac{0,691}{T}}\right)} \quad (dB), \quad (3.5)$$

Nello specifico degli ambienti scolastici, la UNI 11532-2 stabilisce che il descrittore C50 può essere applicato soltanto alle categorie A1, A2, A3, A4 in alternativa allo Speech Transmission Index (STI), esclusivamente per ambienti di dimensioni inferiori ai 250 m³ e ne fornisce il valore di riferimento riferito ad ambienti arredati e non occupati (con la presenza di due persone al massimo), senza impianto di amplificazione o con impianto spento (Tabella 6).

Descrittore	Condizione	V < 250 m ³
C50	Senza impianto di amplificazione o con impianto spento	≥ 2 dB

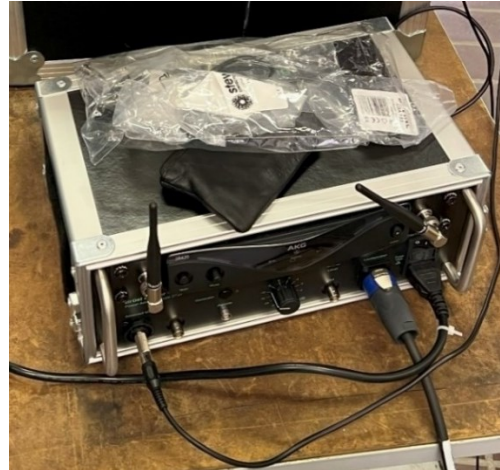
Tabella 7: Valore di riferimento del descrittore C50

3.5.3. Strumenti di misura

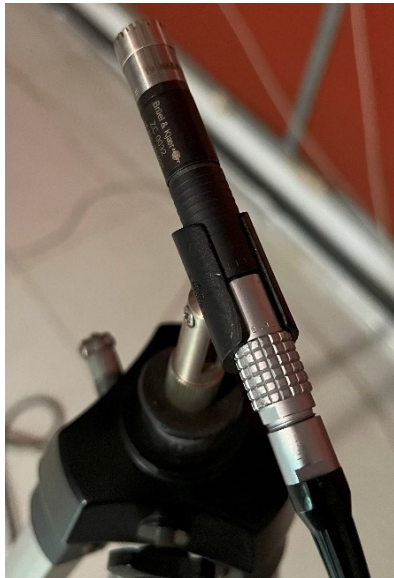
La strumentazione utilizzata nei rilevamenti risponde ai requisiti delle norme UNI:



*Figura 30: Fonometro integratore B&K tipo 2250
Matr. N. 3030464*



*Figura 31: Amplificatore B&K tipo ZC-0032
Matr.N. 3318459*



*Figura 32: Microfono pre-polarizzato B&K da 1/2''
tipo 4189 Matr. N. 3318459*



*Figura 33: Sorgente sonora dodecaedrica
omnidirezionale B&K tipo OmniPower Sound
Source 4292-L*

La strumentazione è di Classe 1, conforme alle Norme IEC61672-1/2 (sostituisce IEC60651, IEC60804) e IEC60942.

Prima e dopo la serie di misurazioni è stata controllata la calibrazione della catena strumentale mediante calibratore acustico secondo la norma UNI 9432/2011.

4. Risultati

Nel capitolo seguente vengono riportati i risultati delle prove effettuate, relativi alla rilevazione della presenza e ai risultati delle prove acustiche delle varie tipologie di controsoffitto utilizzato.

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 34 è dotata di una porta d'accesso alla stanza, la quale, purtroppo, presenta un isolamento termico non ottimale in quella zona.

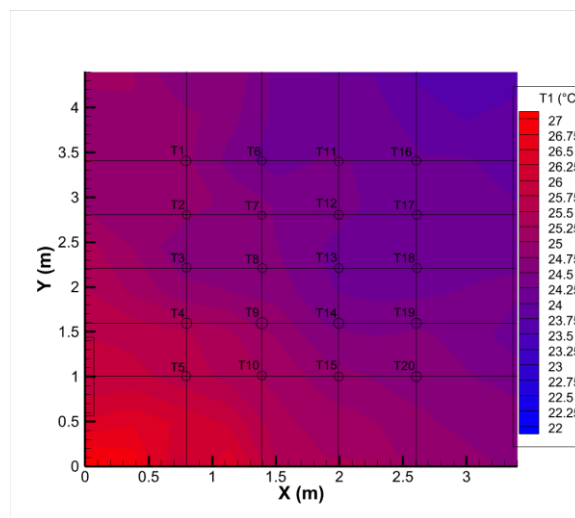


Figura 34: Gradiente termico nella test room

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 35. I grafici con ciascuna delle venti termocoppie sono stati riportati nelle Appendice 1, per quanto riguarda il primo set di prove e nell'Appendice 2 per quanto riguarda il secondo set di prove.

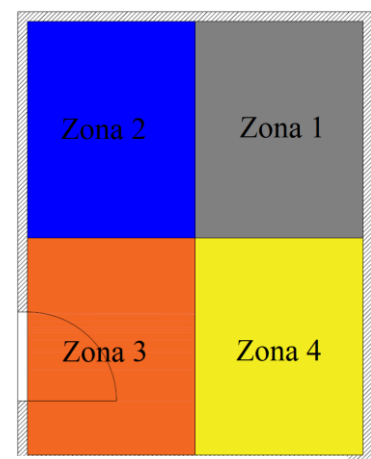


Figura 35: Zone della test room

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 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** 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.

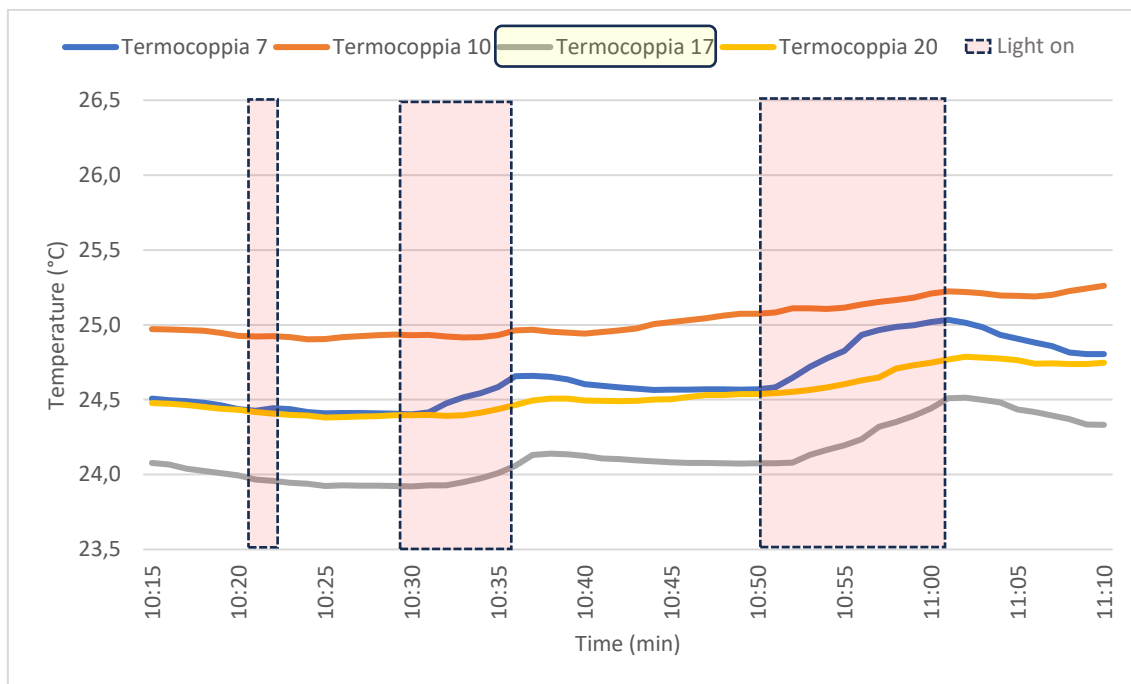


Grafico 1: Accensione lampada 5 minuti, zona I

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, con tre 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.

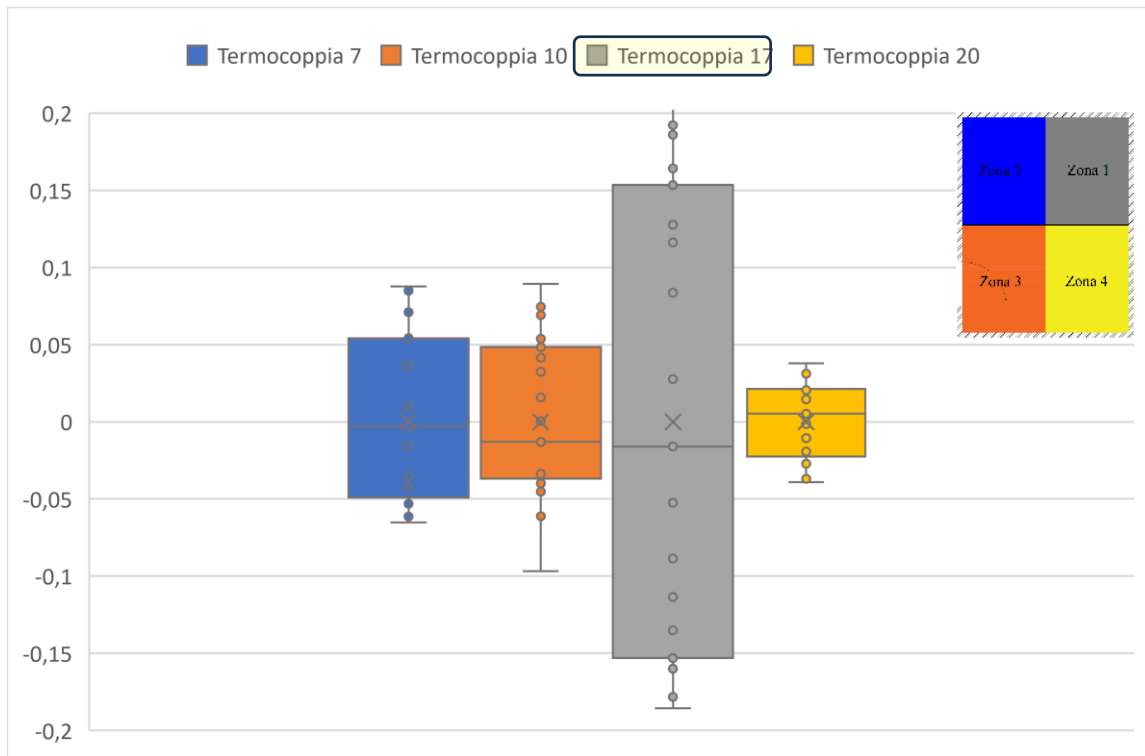


Grafico 2: Box Plot accensione lampada 5 minuti, zona 1

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.

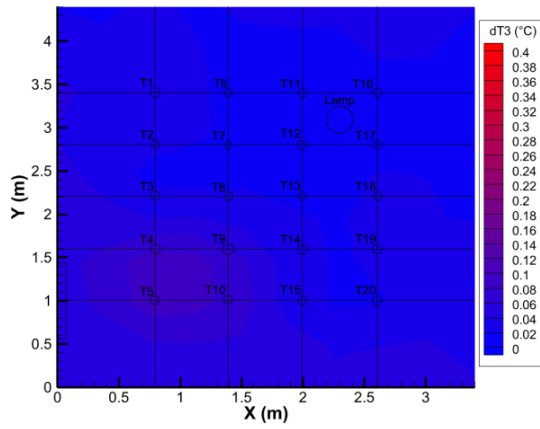


Figura 36: Prova 1-5-10, zona 1, min 5

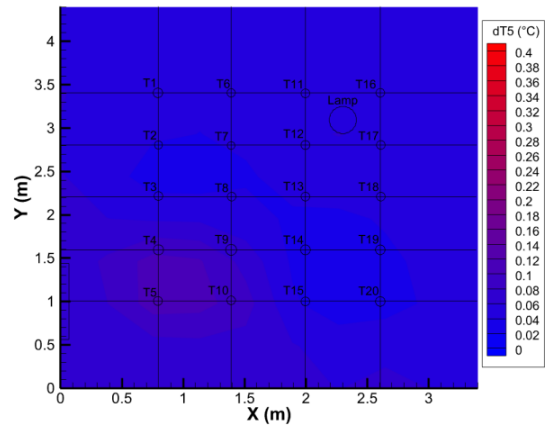


Figura 37: Prova 1-5-10, zona 1, min 6

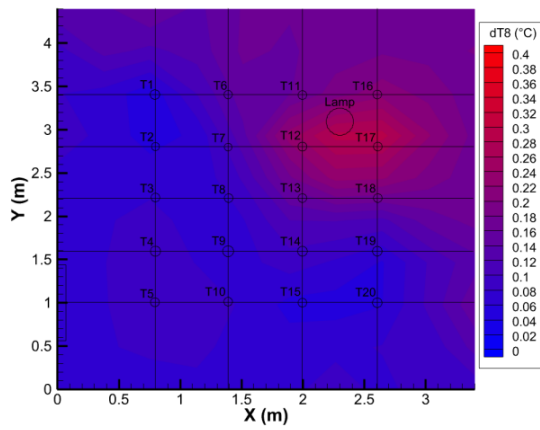


Figura 38: Prova 1-5-10 zona 1, min 8

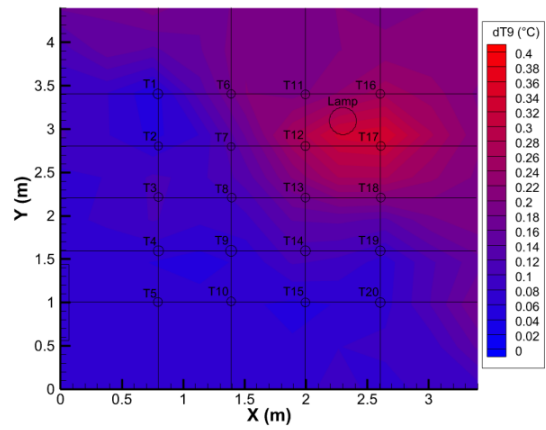


Figura 39: Prova 1-5-10, zona 1, min 10

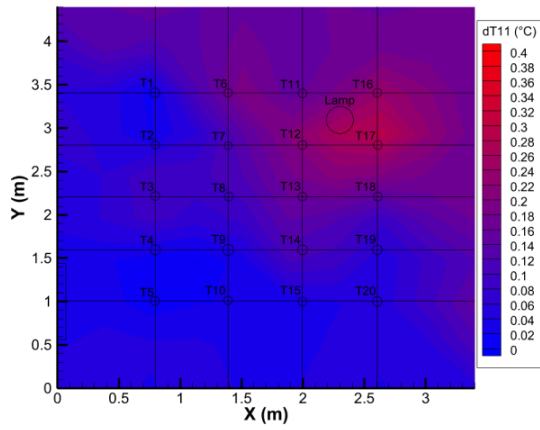


Figura 40: Prova 1-5-10, zona 1, min 11

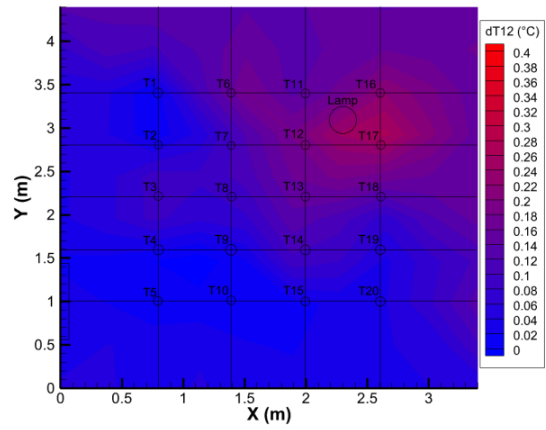


Figura 41: Prova 1-5-10, zona 1, min 12

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 35.

Di seguito gli andamenti delle temperature di quattro termocoppie, una per ciascuna zona. Anche nel Grafico 3 si possono notare aumenti e diminuzioni apprezzabili in due delle quattro termocoppie.

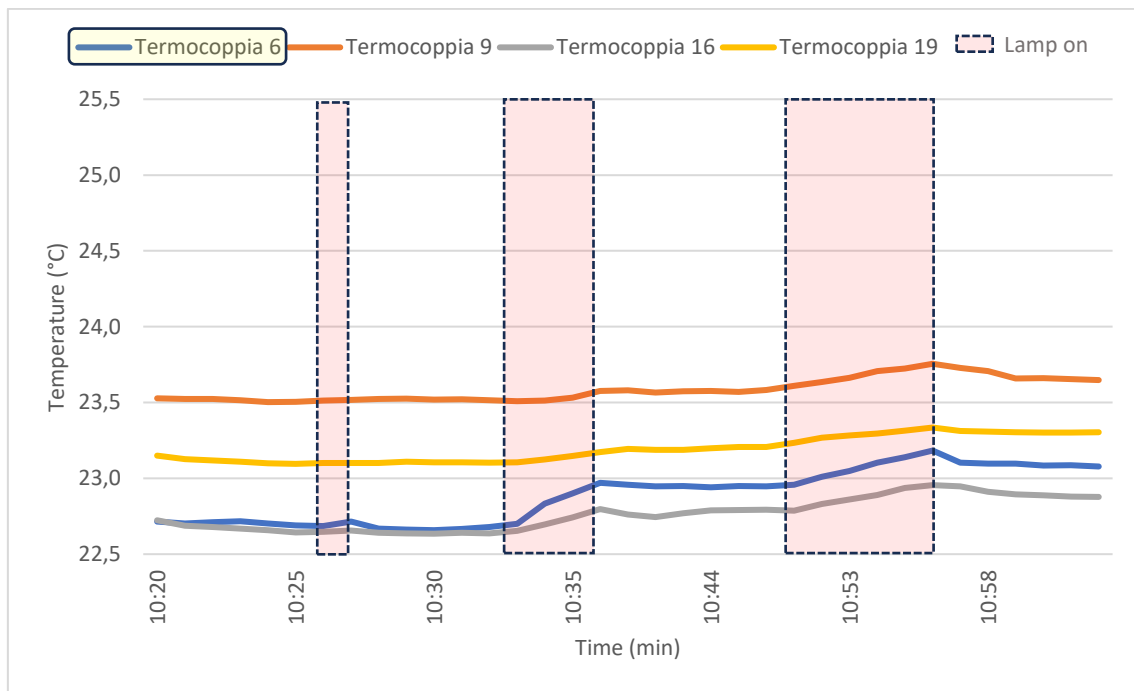


Grafico 3: Accensione lampada 5 minuti, zona 2

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.

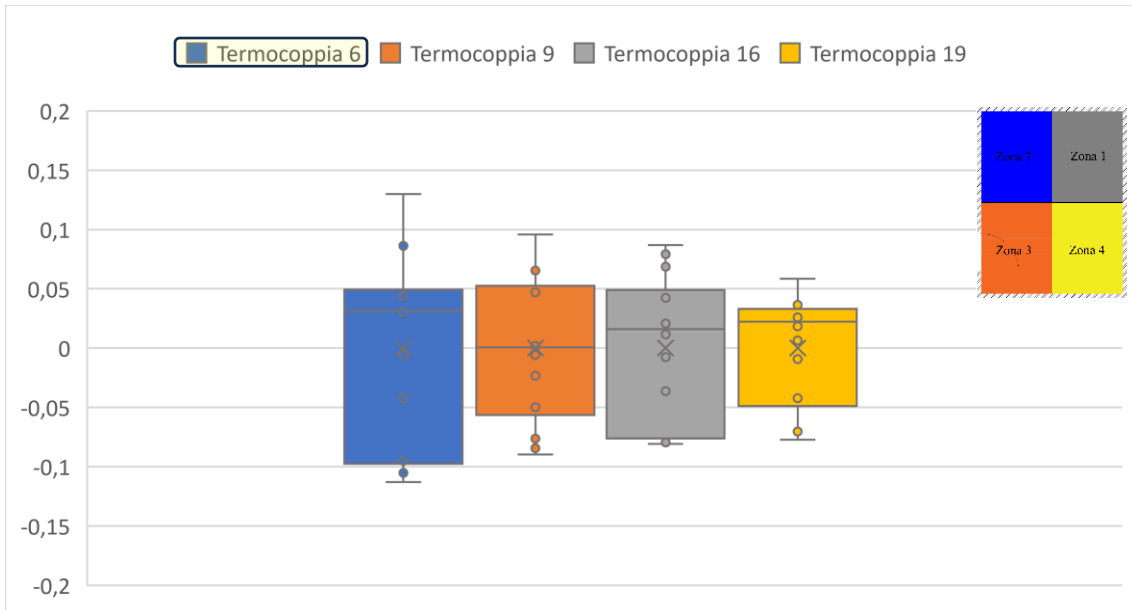


Grafico 4: Box Plot accensione lampada 5 minuti, zona 2

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.

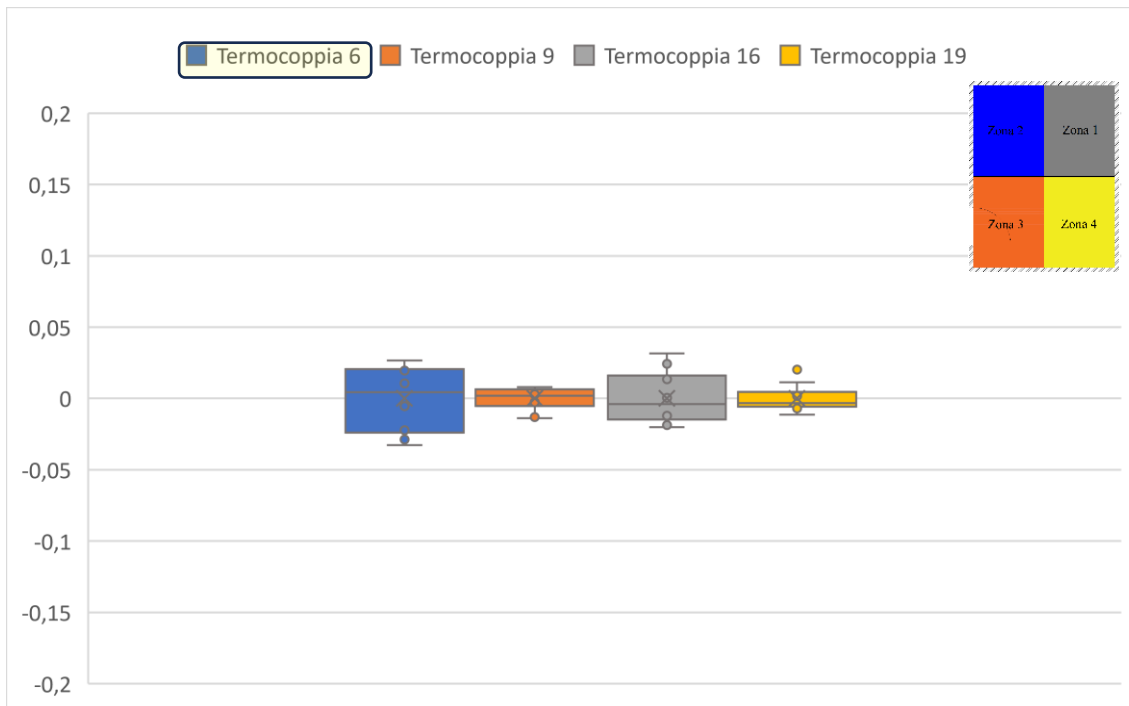


Grafico 5: Box Plot accensione lampada 3 minuti, zona 2

Di seguito le immagini della mappa termica all'interno della test room, con la lampada posta nella zona 2. Le immagini sono anche qui sei delle dodici inserite Appendice 3. Sono i minuti più significativi della prova in cui la lampada è stata accesa per cinque minuti.

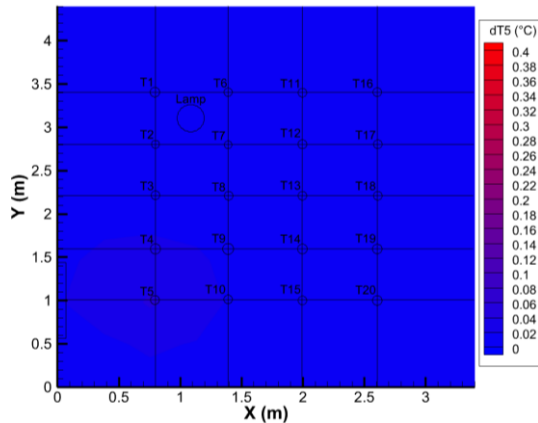


Figura 42: Prova 1-3-5, zona 2, min 5

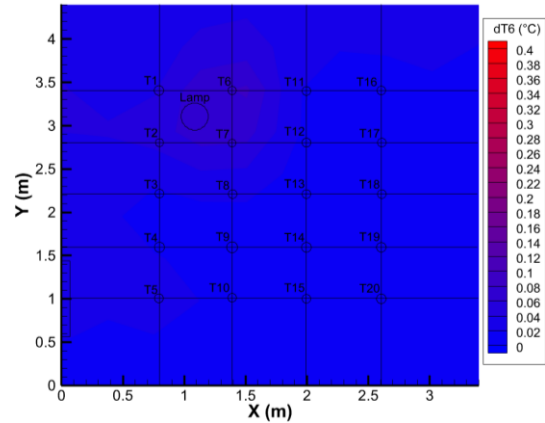


Figura 43: Prova 1-3-5, zona 2, min 6

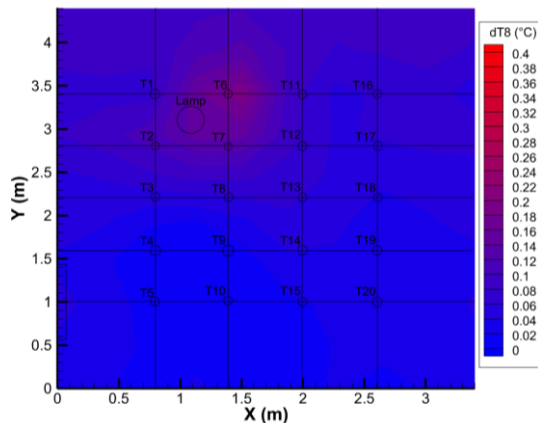


Figura 44: Prova 1-3-5, zona 2, min 8

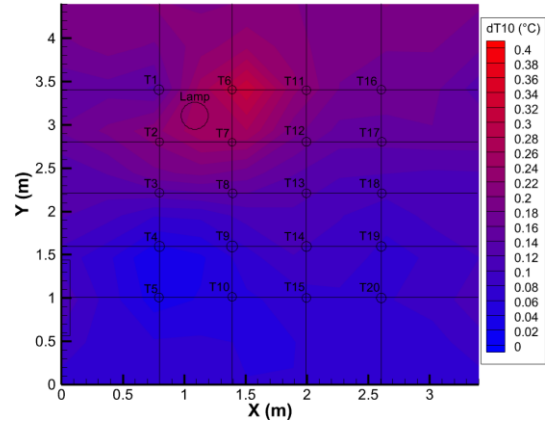


Figura 45: Prova 1-3-5, zona 2, min 10

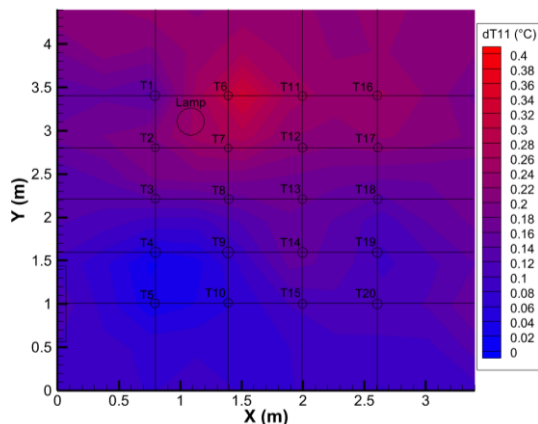


Figura 46: Prova 1-3-5, zona 2, min 11

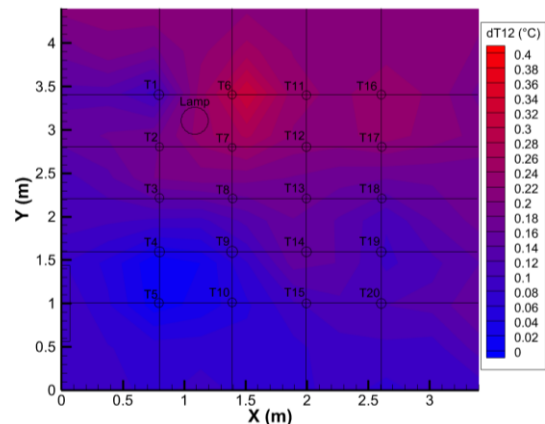


Figura 47: Prova 1-3-5, zona 2, min 12

4.2 Risultati prove acustiche

I dati registrati sono stati mediati in fase di post-elaborazione, nei grafici sottostanti sono riportati rispettivamente i diagrammi del tempo medio di riverbero e dell'indice medio di chiarezza rilevati alle varie frequenze di interesse in condizioni di ambiente vuoto. Le acquisizioni effettuate, sono state riprodotte in maniera speculare tra loro, per quanto riguardano le posizioni e le distanze degli strumenti all'interno dell'ambiente, per tutte le configurazioni della test-room.

4.2.1 Prova acustica senza controsoffitto

Per quanto riguarda la prima prova effettuata, come primo passaggio è stato rimosso il controsoffitto (Figura 48). Rimossa la copertura si è potuta considerare la test room come un ambiente sprovvisto di controsoffittatura, successivamente sono state effettuate le misure in merito al tempo di riverberazione e all'indice di chiarezza.



Figura 48: Test Room con controsoffittatura assente

Tempo di riverbero

I valori del tempo di riverbero medio (T_{mean}) per ogni frequenza, sono ottenuti mediando aritmeticamente i valori di T30 (s) rilevati nelle tre posizioni di misurazione (P1, P2, P3), con due posizioni di sorgente (S1, S2) (Tabella 8).

DATI DI MISURA T30 [s]

Frequency [Hz]	P1S1	P1S2	P2S1	P2S2	P3S1	P3S2	Tmean
	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
125	0,64	0,66	0,71	0,57	0,70	0,74	0,67
250	0,52	0,59	0,65	0,53	0,57	0,60	0,58
500	0,61	0,66	0,67	0,65	0,62	0,55	0,63
1000	0,69	0,69	0,71	0,67	0,73	0,71	0,70
2000	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73	0,74	0,73
4000	0,70	0,70	0,71	0,71	0,70	0,69	0,70

Tabella 8: Tempo di riverbero T30 misurato

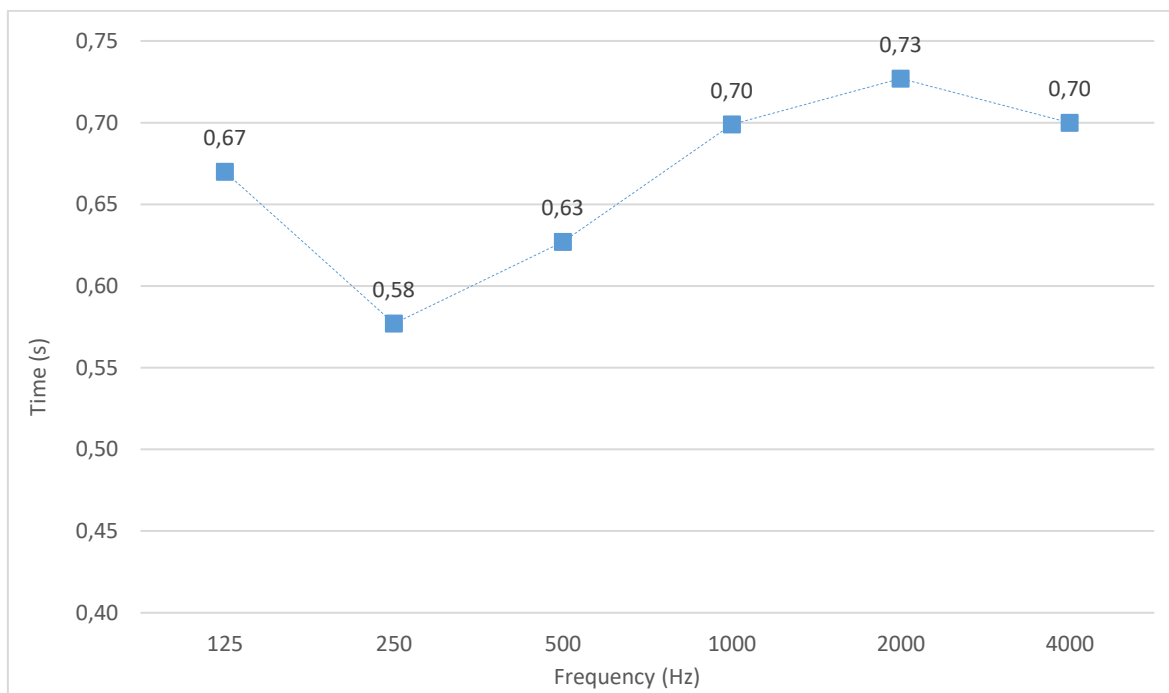


Grafico 6: Variazione in frequenza dei tempi medi di riverbero misurati

Le misure sono effettuate in ambiente non arredato e non occupato, per cui il T_{mean} , per essere confrontato con i valori limite imposti dalla norma, deve essere corretto in funzione del valore della superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone

ΔA_{pers} indicato nel Prospetto C1 e in funzione al volume del locale. Identificando l'attività "Persona seduta su sedia non imbottita" e moltiplicando i valori di ogni frequenza per il numero di occupanti (8 persone), si ottiene ΔA_{pers} totale.

Applicando la formula 3 della UNI 11532-2, il T_{mean} viene corretto ottenendo T_{occ} e può essere confrontato con i limiti di riferimento ottenuti attraverso il calcolo del tempo di riverbero ottimale (T_{ott}) secondo il Prospetto 6 della UNI 11532-2 per la Categoria A3.

Per gli intervalli di confidenza, come descritto precedentemente, si determina la categoria, e si procede al calcolo del T_{ott} , in funzione del volume, come quanto segue.

Categoria	Ambiente occupato 80%	
A3	$T_{ott} = (0,32 * \text{Log} V - 0,17)$	$30 < V < 5000$

Tabella 9: Categorie utilizzata in relazione all'attività e formula di calcolo T_{ott}

Dimensioni	Dati di input
Lunghezza (m)	4,33
Larghezza (m)	3,35
Altezza (m)	2,7
Volume (m ³)	39
Superficie totale (m ²)	14,5
Occupazione 100% (N°)	8
80% Occupazione (N°)	6,4

Tabella 10: Caratteristiche della Test Room

Limite	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Superiore	$1,45 * T_{ott}$	$1,20 * T_{ott}$	$1,20 * T_{ott}$	$1,20 * T_{ott}$	$1,20 * T_{ott}$	$1,20 * T_{ott}$
Inferiore	$0,65 * T_{ott}$	$0,80 * T_{ott}$	$0,80 * T_{ott}$	$0,80 * T_{ott}$	$0,80 * T_{ott}$	$0,65 * T_{ott}$

Tabella 11: Andamento in frequenza del tempo di riverberazione ottimale

Per il calcolo del tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% si utilizza la seguente formula:

$$T_{occ} = \frac{T_{mean}}{1 + \frac{\Delta A_{pers} T_{mean}}{0,16V}} \quad (s), \quad (3.2)$$

Dove:

- T_{occ} è il tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% in s;
- T_{mean} è il tempo di riverbero ottimale per la stanza non occupata e ammobiliata in s;
- V è il volume della stanza in m^3 ;
- ΔA_{pers} è l'area di assorbimento equivalente di una persona m^2 .

Frequency [Hz]	$\Delta A(pers)$	N aula	T_{occ}	Intervallo di Confidenza	
	[m^2]	[-]	[s]	limite inferiore	limite superiore
125	0,15	0,96	0,61	0,22	0,49
250	0,3	1,92	0,49	0,27	0,41
500	0,4	2,56	0,50	0,27	0,41
1000	0,45	2,88	0,53	0,27	0,41
2000	0,55	3,52	0,52	0,27	0,41
4000	0,55	3,52	0,50	0,22	0,41

Tabella 12: Verifica del tempo di riverbero

Quindi nel Grafico 7 viene rappresentata, la curva relativa al T_{occ} , valore del tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% (ovvero T_{mean} corretto), e i limiti di confidenza riportati in Tabella 12, calcolati per la Categoria A3.

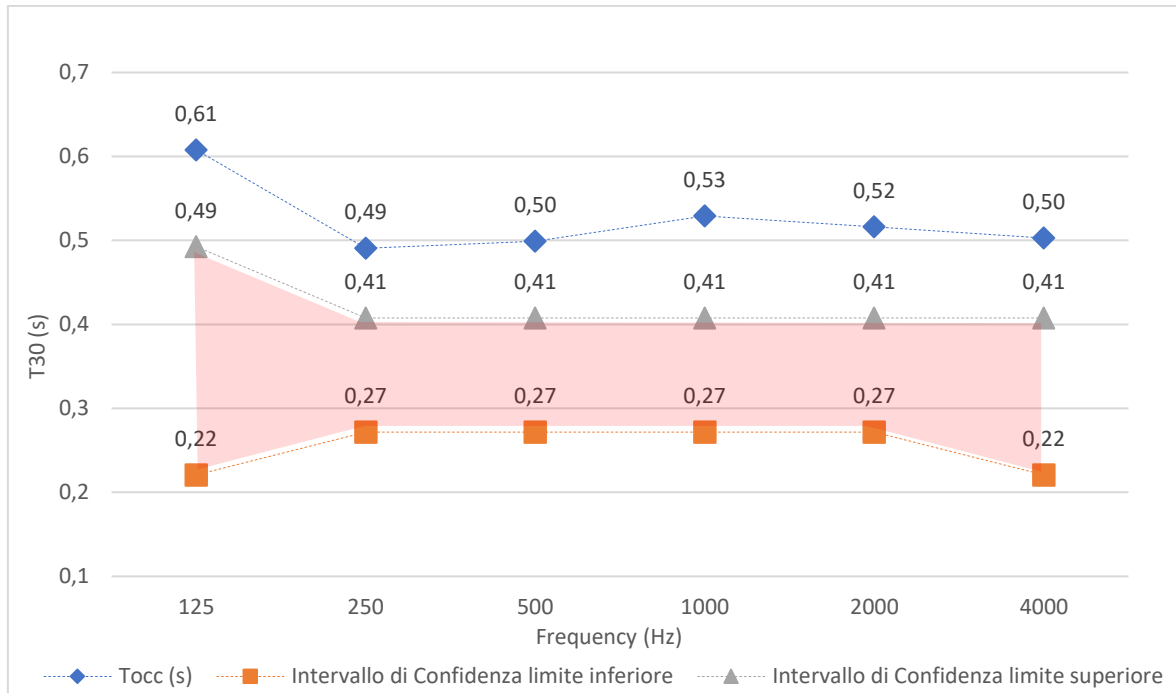


Grafico 7: Intervalli di conformità del valore del tempo di riverberazione di progetto

Dai valori riportati nel Grafico 7, possiamo notare come l'andamento relativo ai valori di T_{occ} , ovvero tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80%, è al di sopra dell'intervallo di confidenza evidenziato in rosso, calcolato con il tempo di riverbero ottimale (T_{ott}), non rientrando all'interno dei limiti superiori e inferiori. Quindi il tempo di riverbero non è verificato.

C50 (Speech Clarity)

I valori di C50 rilevati alle singole posizioni di misurazione, sono ottenuti come media aritmetica dei valori delle pressioni sonore nelle bande d'ottava 125-250-500-1000-2000-4000 Hz (Tabella 13).

DATI DI MISURA C50 [dB]

Frequency [Hz]	Avg	P1S1	P1S2	P2S1	P2S2	P3S1	P3S2
		[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
125	3,1	2,8	7,1	1,0	4,3	2,7	1,0
250	3,4	2,6	2,8	1,5	5,6	4,4	3,7
500	4,7	4,0	5,2	3,8	5,3	5,2	4,6
1000	3,4	3,3	4,4	2,6	3,5	3,0	3,8
2000	1,7	0,8	2,2	1,9	2,0	0,4	3,1
4000	2,7	2,1	3,6	2,5	3,3	1,9	2,7

Tabella 13: Risultati delle misure per il calcolo dello C50

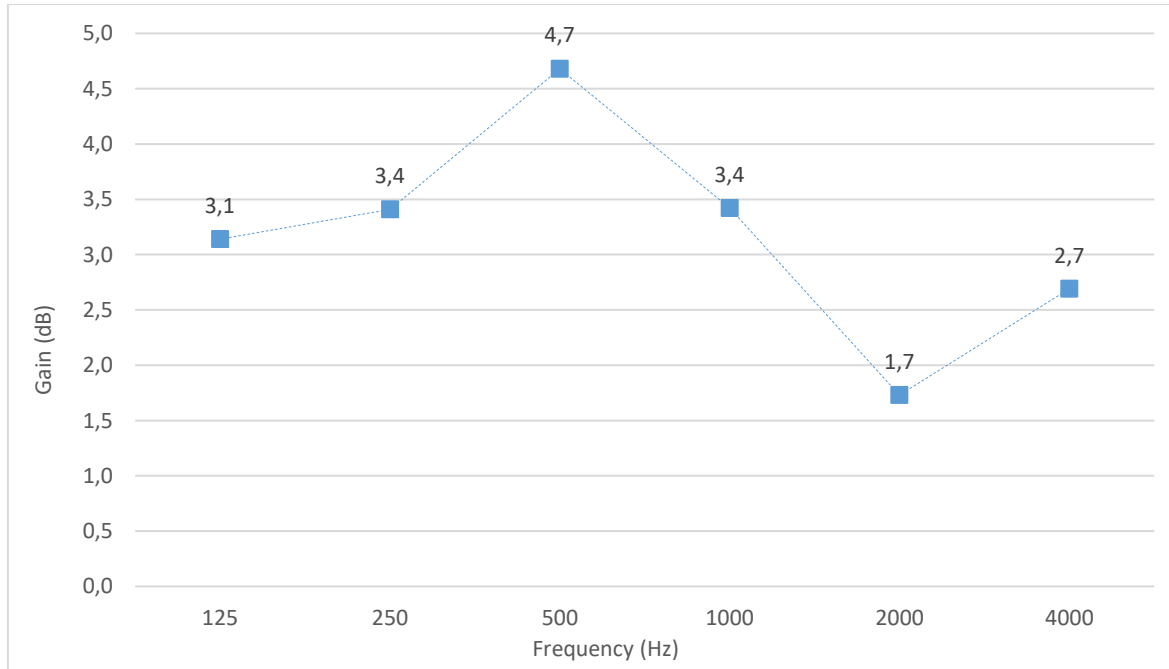


Grafico 8: Variazione in frequenza degli indici medi di chiarezza misurati

Negli ambienti scolastici, la UNI 11532-2 stabilisce che il descrittore C50 può essere applicato soltanto alle categorie A1, A2, A3, A4 in alternativa allo Speech Transmission

Index (STI), esclusivamente per ambienti di dimensioni inferiori ai 250 m³ e ne fornisce il valore di riferimento riferito ad ambienti arredati e non occupati, senza impianto di amplificazione o con impianto spento, ovvero per $V < 250 \text{ m}^3$ il C50 deve essere $\geq 2 \text{ dB}$.

Quindi come riportato nel Grafico 8 la chiarezza del parlato risulta verificata per quanto riguardano le frequenze 125-250-500-1000-4000 Hz, mentre risulta negativa solo nel caso della banda di frequenza dei 2000 Hz.

4.2.2 Prova acustica pannelli standard

Per quanto riguarda la seconda prova effettuata, come prima passaggio sono stati installati i pannelli standard (Figura 49,50), ovvero quelli che si possono trovare normalmente nella maggior parte dei controsoffitti delle aule scolastiche o degli uffici. Successivamente, sono state effettuate le misure come per la prima tipologia di pannelli.



Figura 49: Foto Installazione Pannelli Standard



Figura 50: Foto dettaglio Pannello Standard

Tempo di riverbero

I valori del tempo di riverbero medio (T_{mean}) per ogni frequenza, sono ottenuti mediando aritmeticamente i valori di T30 (s) rilevati alle tre posizioni di misurazione (P1, P2, P3), con due posizioni di sorgente (S1, S2) (Tabella 14).

DATI DI MISURA T30 [s]

Frequency [Hz]	P1S1	P1S2	P2S1	P2S2	P3S1	P3S2	Tmean
	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
125	0,61	0,83	0,75	0,77	0,71	0,86	0,75
250	0,69	0,71	0,62	0,61	0,64	0,62	0,65
500	0,51	0,51	0,51	0,46	0,52	0,52	0,51
1000	0,53	0,56	0,53	0,52	0,54	0,55	0,54
2000	0,55	0,55	0,54	0,53	0,56	0,53	0,54
4000	0,53	0,53	0,54	0,53	0,54	0,54	0,53

Tabella 14: Tempo di riverbero T30 misurato

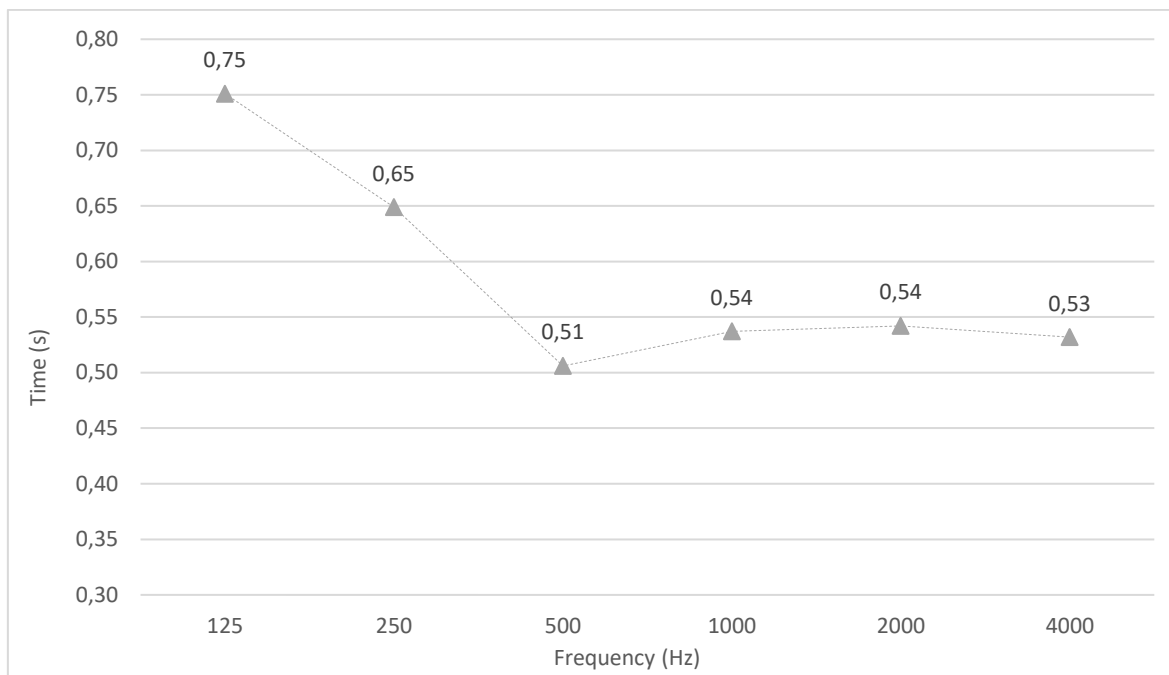


Grafico 9: Variazione in frequenza dei tempi medi di riverbero misurati

Le misure sono effettuate in ambiente non arredato e non occupato, per cui il T_{mean} per essere confrontato con i valori limite imposti dalla norma, deve essere corretto in funzione del valore della superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone ΔA_{pers} indicato nel Prospetto C1 e in funzione al volume del locale. Identificando l'attività "Persona seduta su sedia non imbottita" e moltiplicando i valori di ogni frequenza per il numero di occupanti (8 persone), si ottiene ΔA_{pers} totale.

Applicando la formula 3 della UNI 11532-2, il T_{mean} viene corretto ottenendo T_{occ} e può essere confrontato con i limiti di riferimento ottenuti attraverso il calcolo del tempo di riverbero ottimale (T_{ott}) secondo il Prospetto 6 della UNI 11532-2 per la Categoria A3.

Per gli intervalli di confidenza, come descritto precedentemente, si determina la categoria e si procede al calcolo del T_{ott} , in funzione del volume, come quanto segue.

Categoria	Ambiente occupato 80%	
A3	$T_{ott} = (0,32 * \text{Log} V - 0,17)$	$30 < V < 5000$

Tabella 15: Categorie utilizzate in relazione all'attività e formula di calcolo T_{ott}

Dimensioni	Dati di input
Lunghezza (m)	4,33
Larghezza (m)	3,35
Altezza (m)	2,7
Volume (m ³)	39
Superficie totale (m ²)	14,5
Occupazione 100% (N°)	8
80% Occupazione (N°)	6,4

Tabella 16: Caratteristiche della Test Room

Limite	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Superiore	1,45*Tott	1,20*Tott	1,20*Tott	1,20*Tott	1,20*Tott	1,20*Tott
Inferiore	0,65*Tott	0,80*Tott	0,80*Tott	0,80*Tott	0,80*Tott	0,65*Tott

Tabella 17: Andamento in frequenza del tempo di riverberazione ottimale

Per il calcolo del tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% si utilizza la seguente formula:

$$T_{occ} = \frac{T_{mean}}{1 + \frac{\Delta A_{pers} T_{mean}}{0,16V}} \quad (s), \quad (3.2)$$

Dove:

- T_{occ} è il tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% in s;
- T_{mean} è il tempo di riverbero ottimale per la stanza non occupata e ammobiliata in s;
- V è il volume della stanza in m³;
- ΔA_{pers} è l'area di assorbimento equivalente di una persona m².

Frequency [Hz]	$\Delta A(pers)$	N aula	Tocc	Intervallo Di Confidenza	
	[m ²]	[-]	[s]	limite inferiore	limite superiore
125	0,15	0,96	0,67	0,22	0,49
250	0,30	1,92	0,54	0,27	0,41
500	0,40	2,56	0,42	0,27	0,41
1000	0,45	2,88	0,43	0,27	0,41
2000	0,55	3,52	0,42	0,27	0,41
4000	0,55	3,52	0,41	0,22	0,41

Tabella 18: Verifica del tempo di riverbero

Quindi nel Grafico 10 viene rappresentata, la curva relativa al T_{occ} , valore del tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% (ovvero $T_{mean\ corretto}$), e i limiti di confidenza riportati in tabella 18, calcolati per la Categoria A3.

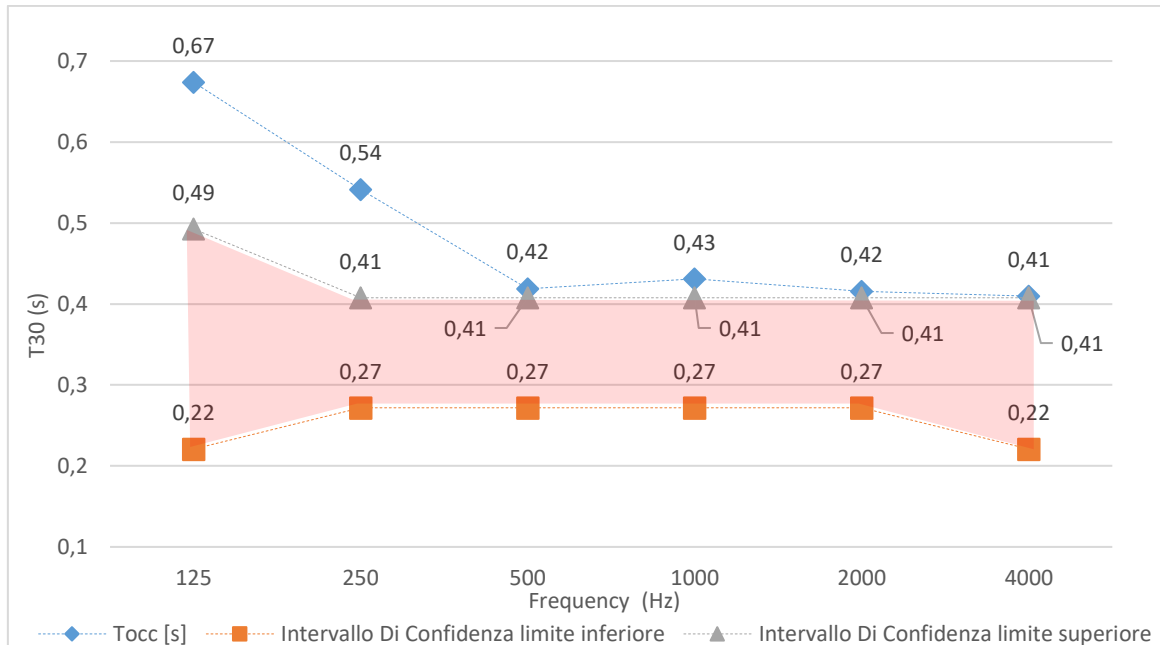


Grafico 10: Intervalli di confidenza T_{30}

Dai valori riportati nel Grafico 10 possiamo notare come rispetto alla prima prova effettuata, la misura dei T_{occ} , inizialmente ha un andamento pressoché identico alla situazione senza controsoffitto, poi però all'aumentare della frequenza i valori raggiungono quelli dell'intervallo di confidenza evidenziato in rosso, arrivando ad eguagliare i valori relativi al limite superiore.

Quindi per quanto riguarda la tipologia di pannelli standard, la verifica del tempo di riverbero si può considerare in parte verificata.

C50 (Speech Clarity)

I valori di C50 rilevati alle singole posizioni di misurazione, sono ottenuti come media aritmetica dei valori delle pressioni sonore nelle bande d'ottava 125-250-500-1000-2000-4000 Hz (Tabella 19).

DATI DI MISURA C50 [dB]

Frequency [Hz]	Avg	P1S1	P1S2	P2S1	P2S2	P3S1	P3S2
		[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
125	2,50	6,7	0,8	-2,1	3,2	6,9	-0,4
250	4,90	4,5	4,3	0,9	6,1	8,2	5,5
500	5,40	3,5	8,1	6,4	2,9	4,5	6,9
1000	6,30	7,1	3,9	6,8	6,5	8,0	5,5
2000	5,00	4,6	4,1	4,9	5,8	4,8	5,5
4000	4,70	4,6	4,1	4,8	4,2	5,1	5,4

Tabella 19: Risultati delle misure per il calcolo dello C50

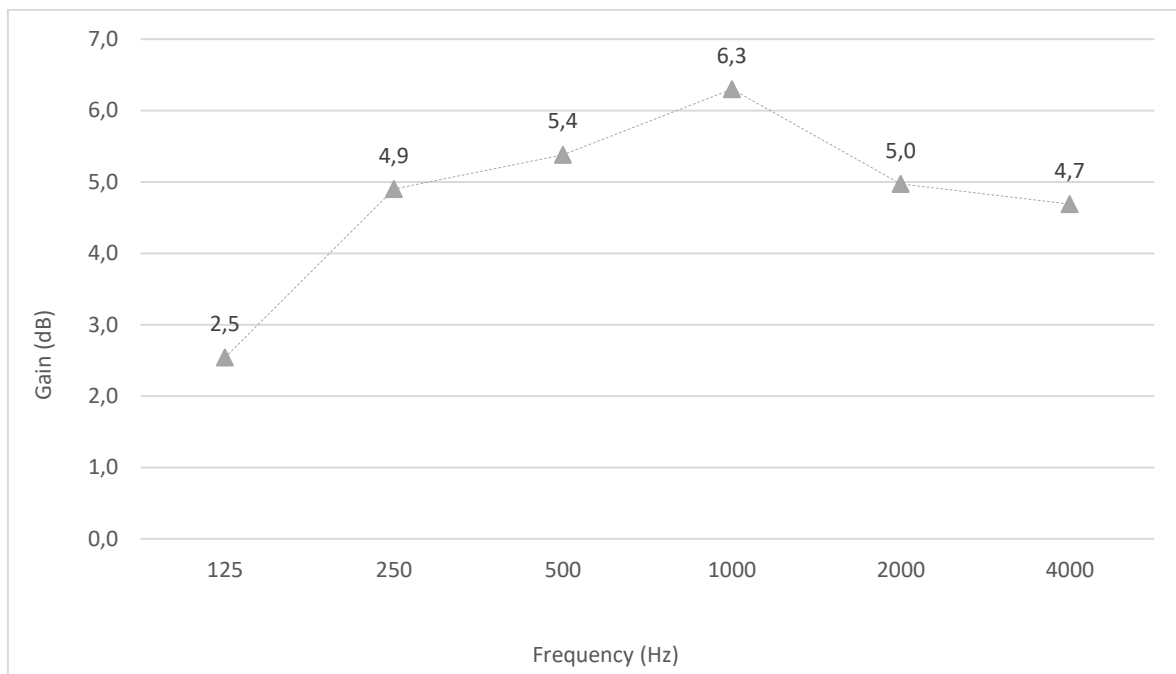


Grafico 11: Variazione in frequenza degli indici medi di chiarezza misurata

Negli ambienti scolastici, la UNI 11532-2 stabilisce che il descrittore C50 può essere applicato soltanto alle categorie A1, A2, A3, A4 in alternativa allo Speech Transmission Index (STI), esclusivamente per ambienti di dimensioni inferiori ai 250 m³ e ne fornisce il valore di riferimento riferito ad ambienti arredati e non occupati, senza impianto di amplificazione o con impianto spento, ovvero per $V < 250 \text{ m}^3$ il C50 deve essere $\geq 2 \text{ dB}$. Come riportato nel Grafico 11 si hanno buoni risultati di chiarezza del parlato per tutte le bande di frequenza analizzate.

4.2.3 Prova acustica pannelli innovativi

Per quanto riguarda la terza ed ultima prova, si è passati all'installazione di una nuova tipologia di pannelli, ripetendo le misure come per la prima e la seconda prova.



Figura 51: Test Room con Pannelli Innovativi installati



Figura 52: Foto Pannello Innovativo



Figura 53: Foto dettaglio Pannello Innovativo

Tempo di riverbero

I valori del tempo di riverbero medio (T_{mean}) per ogni frequenza, sono ottenuti mediando aritmeticamente i valori di T30 (s) rilevati alle tre posizioni utente (P1, P2, P3), con due posizioni di sorgente (S1, S2) (Tabella 20).

DATI DI MISURA T30 [s]

Frequency [Hz]	P1S1	P1S2	P2S1	P2S2	P3S1	P3S2	Tmean
	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
125	0,68	0,57	0,62	0,67	0,65	0,64	0,64
250	0,51	0,50	0,47	0,53	0,54	0,46	0,50
500	0,58	0,61	0,57	0,55	0,52	0,59	0,57
1000	0,59	0,58	0,59	0,59	0,60	0,59	0,59
2000	0,55	0,52	0,55	0,56	0,55	0,55	0,55
4000	0,51	0,52	0,51	0,52	0,51	0,52	0,51

Tabella 20: Tempo di riverbero T30 misurato

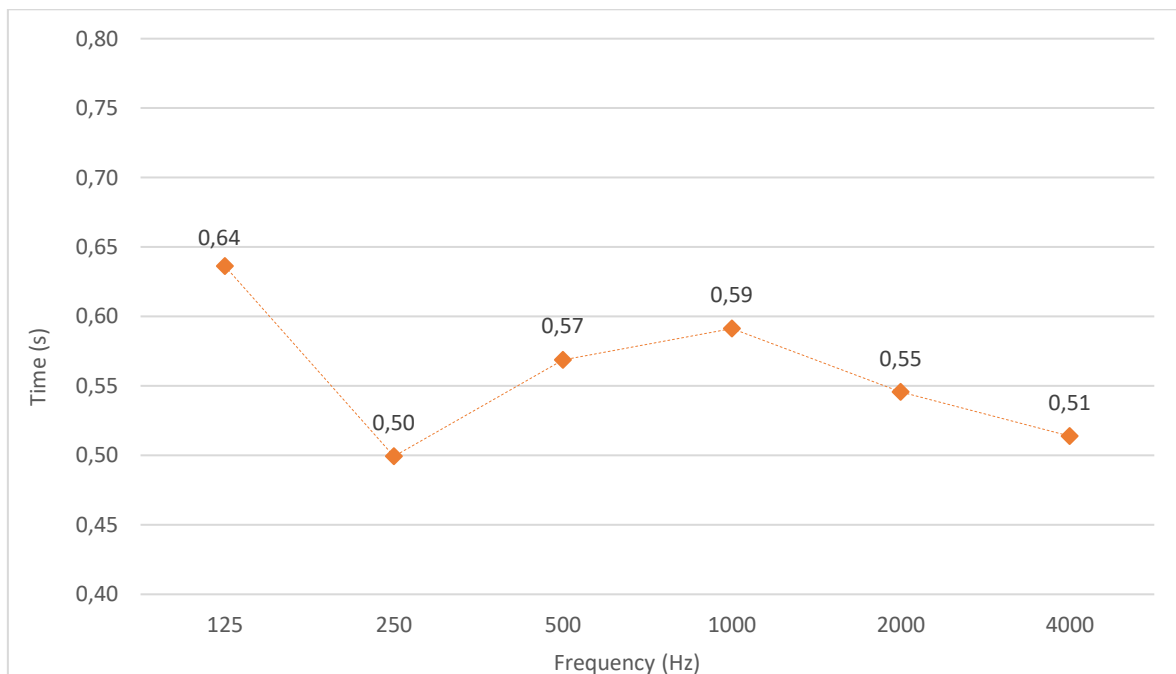


Grafico 12: Variazione in frequenza dei tempi medi di riverbero misurati

Le misure sono effettuate in ambiente non arredato e non occupato, per cui il T_{mean} , per essere confrontato con i valori limite imposti dalla norma, deve essere corretto in funzione del valore della superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone ΔA_{pers} indicato nel Prospetto C1 e in funzione al volume del locale. Identificando l'attività "Persona seduta su sedia non imbottita" e moltiplicando i valori di ogni frequenza per il numero di occupanti (8 persone), si ottiene ΔA_{pers} totale.

Applicando la formula 3 della UNI 11532-2, il T_{mean} viene corretto ottenendo T_{occ} e può essere confrontato con i limiti di riferimento ottenuti attraverso il calcolo del tempo di riverbero ottimale (T_{ott}) secondo il Prospetto 6 della UNI 11532-2 per la Categoria A3.

Per gli intervalli di confidenza, come descritto precedentemente, si determina la categoria e si procede al calcolo del T_{ott} , in funzione del volume, come quanto segue.

Categoria	Ambiente occupato 80%	
A3	$T_{ott}=(0,32*\text{Log}V - 0,17)$	$30 < V < 5000$

Tabella 21: Categorie utilizzate in relazione all'attività e formula di calcolo T_{ott}

Elementi	Dati di input
Lunghezza (m)	4,33
Larghezza (m)	3,35
Altezza (m)	2,7
Volume (m ³)	39
Superficie totale (m ²)	14,5
Occupazione 100% (N°)	8
80% Occupazione (N°)	6,4

Tabella 22: Caratteristiche della Test Room

Limite	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Superiore	$1,45*T_{ott}$	$1,20*T_{ott}$	$1,20*T_{ott}$	$1,20*T_{ott}$	$1,20*T_{ott}$	$1,20*T_{ott}$
Inferiore	$0,65*T_{ott}$	$0,80*T_{ott}$	$0,80*T_{ott}$	$0,80*T_{ott}$	$0,80*T_{ott}$	$0,65*T_{ott}$

Tabella 23: Andamento in frequenza del tempo di riverberazione ottimale

Per il calcolo del tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% si utilizza la seguente formula:

$$T_{occ} = \frac{T_{mean}}{1 + \frac{\Delta A_{pers} T_{mean}}{0,16V}} \quad (\text{s}), \quad (3.2)$$

Dove:

- T_{occ} è il tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% in s;
- T_{mean} è il tempo di riverbero ottimale per la stanza non occupata e ammobiliata in s;
- V è il volume della stanza in m³;
- ΔA_{pers} è l'area di assorbimento equivalente di una persona m².

Frequency [Hz]	ΔA (pers)	N aula	T _{occ}	Intervallo Di Confidenza	
	[m ²]	[-]	[s]	limite inferiore	limite superiore
125	0,15	0,96	0,58	0,22	0,49
250	0,30	1,92	0,43	0,27	0,41
500	0,40	2,56	0,46	0,27	0,41
1000	0,45	2,88	0,46	0,27	0,41
2000	0,55	3,52	0,42	0,27	0,41
4000	0,55	3,52	0,40	0,22	0,41

Tabella 24: Verifica del tempo di riverbero

Quindi nel Grafico 13 viene rappresentata, la curva relativa al T_{occ} , valore del tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% (ovvero T_{mean} corretto), e i limiti di confidenza riportati in Tabella 24, calcolati per la Categoria A3.

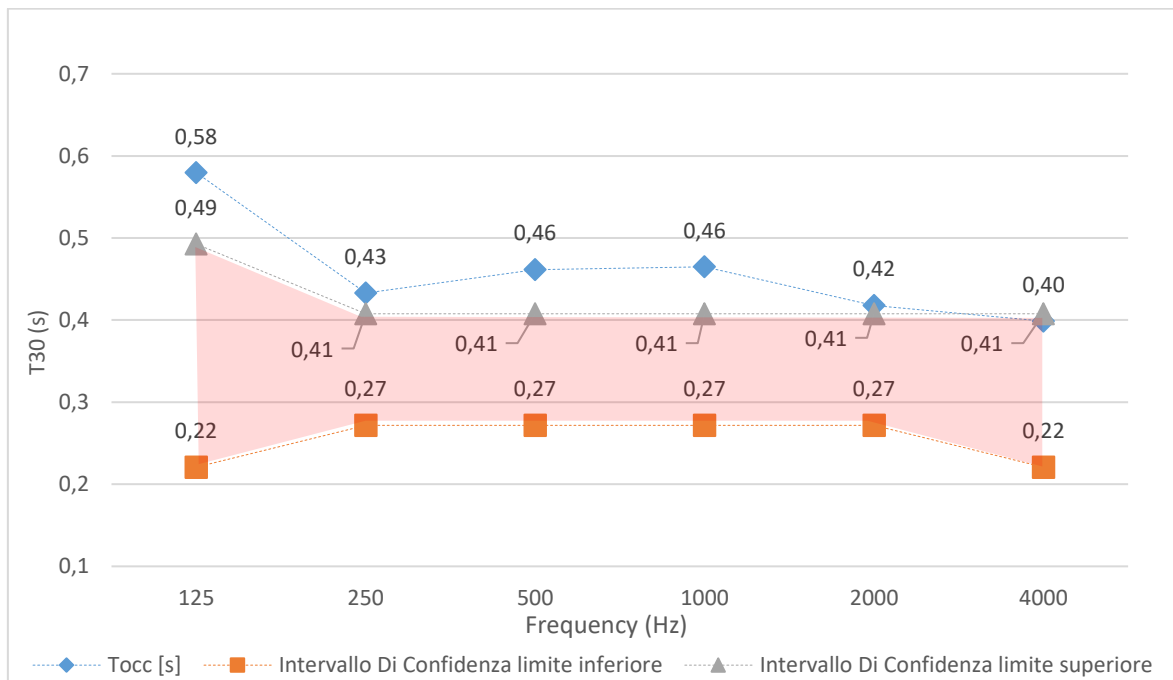


Grafico 13: Intervalli di confidenza T30

Come possiamo notare nel Grafico 13 relativo ai pannelli innovativi e facendo riferimento alle due prove precedenti, si nota che i valori del tempo di riverbero ottimale per la stanza occupata all'80% sono diminuiti per tutte le bande di frequenza analizzate, arrivando poco al di sopra o eguagliando il limite superiore dell'intervallo di confidenza evidenziato in rosso, ad eccezione del primo intervallo ai 125 Hz che continua a rimanere leggermente più alta.

C50 (Speech Clarity)

I valori di C50 rilevati alle singole posizioni di misurazione, sono ottenuti come media aritmetica dei valori delle pressioni sonore nelle bande d'ottava 125-250-500-1000-2000-4000 Hz (Tabella 25).

DATI DI MISURA C50 [dB]

Frequency [Hz]	Avg	P1S1	P1S2	P2S1	P2S2	P3S1	P3S2
		[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
125	5,55	5,07	6,99	3,96	6,11	4,76	6,39
250	6,55	5,85	6,65	4,84	7,69	7,25	6,99
500	7,64	7,92	6,02	9,16	8,62	6,56	7,58
1000	7,85	7,9	8,69	7,45	7,66	8,54	6,84
2000	6,88	7,64	6,42	7,61	6,51	6,99	6,12
4000	6,22	5,82	6,21	6,75	5,69	6,51	6,34

Tabella 25: Risultati delle misure per il calcolo dello C50

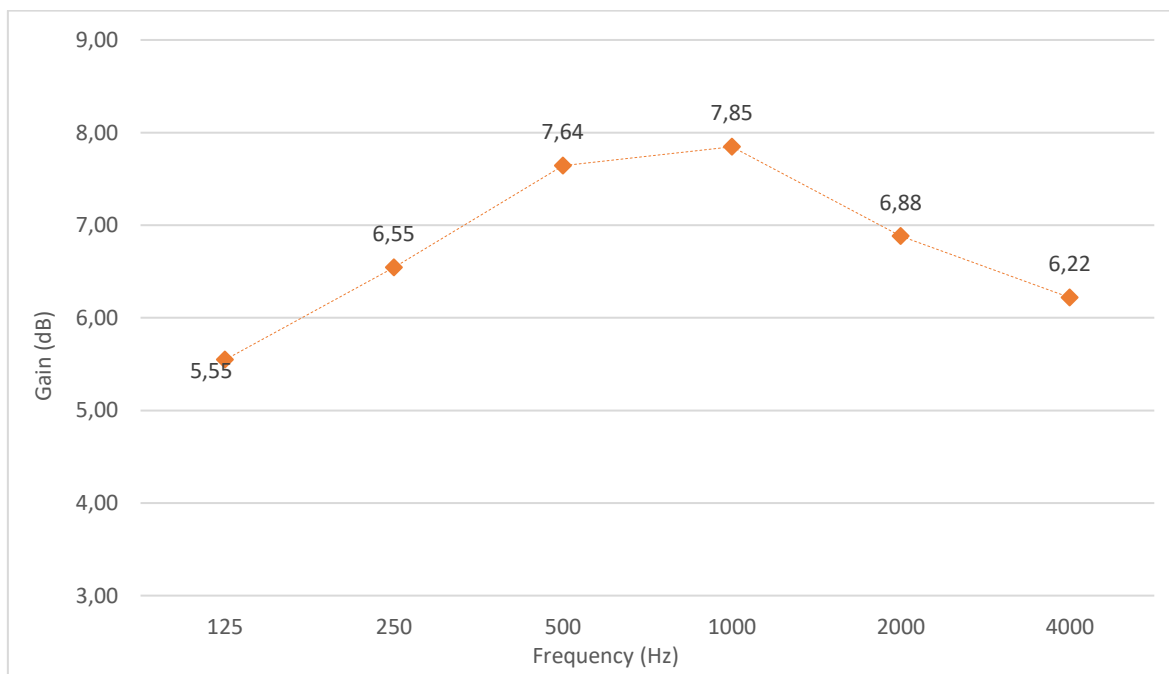


Grafico 14: Variazione in frequenza degli indici medi di chiarezza misurata

Negli ambienti scolastici, la UNI 11532-2 stabilisce che il descrittore C50 può essere applicato soltanto alle categorie A1, A2, A3, A4 in alternativa allo Speech Transmission Index (STI), esclusivamente per ambienti di dimensioni inferiori ai 250 m³ e ne fornisce il valore di riferimento riferito ad ambienti arredati e non occupati, senza impianto di amplificazione o con impianto spento, ovvero per $V < 250 \text{ m}^3$ il C50 deve essere $\geq 2 \text{ dB}$.

Come riportato nel Grafico 14 si hanno ottimi risultati per quanto riguarda la chiarezza del parlato, tutti i valori sono ampiamente sopra il valore minimo da rispettare secondo la normativa.

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 tradizionali e la tipologia innovativa. Le prove condotte hanno riguardato in particolare l'efficienza acustica.

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.[23]. 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 nel 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.

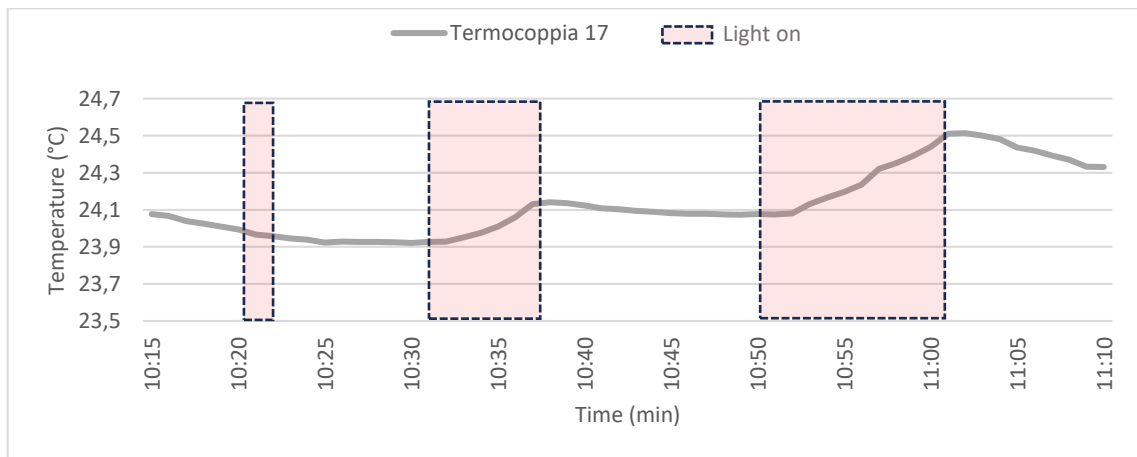


Grafico 15: Andamento temperatura durante una prova in Test Room

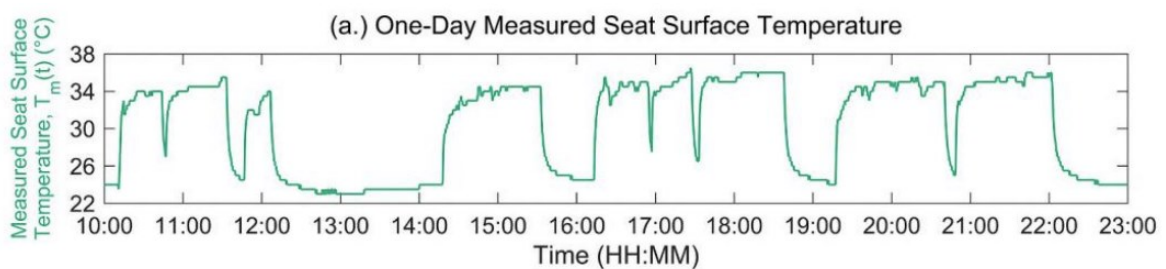


Grafico 16: Andamento temperatura durante una prova. Grafico preso dall'articolo di Wagner et al

5.2 Efficienza acustica dei pannelli innovativi

La maggior parte dell'energia sonora prodotta dal "parlato" è determinata dalle vocali, presenti soprattutto nell'intervallo di frequenza compreso tra 250 Hz e 500 Hz, mentre l'intelligibilità del messaggio vocale è fornita dalle consonanti, che interessano principalmente la gamma di frequenze che va da 2000 Hz a 4000 Hz. Anche i sistemi di VMC rientrano in una banda di frequenza che generalmente va da 250 a 4000 Hz. Quindi è di fondamentale importanza analizzare l'andamento ed il miglioramento dei parametri misurati nelle relative prove effettuate.

Nel Grafico 17 vengono messi a confronto i tempi medi di riverbero alle varie frequenze in riferimento alle diverse tipologie di configurazione, riportate nel capitolo 4.2 Risultati prove acustiche.

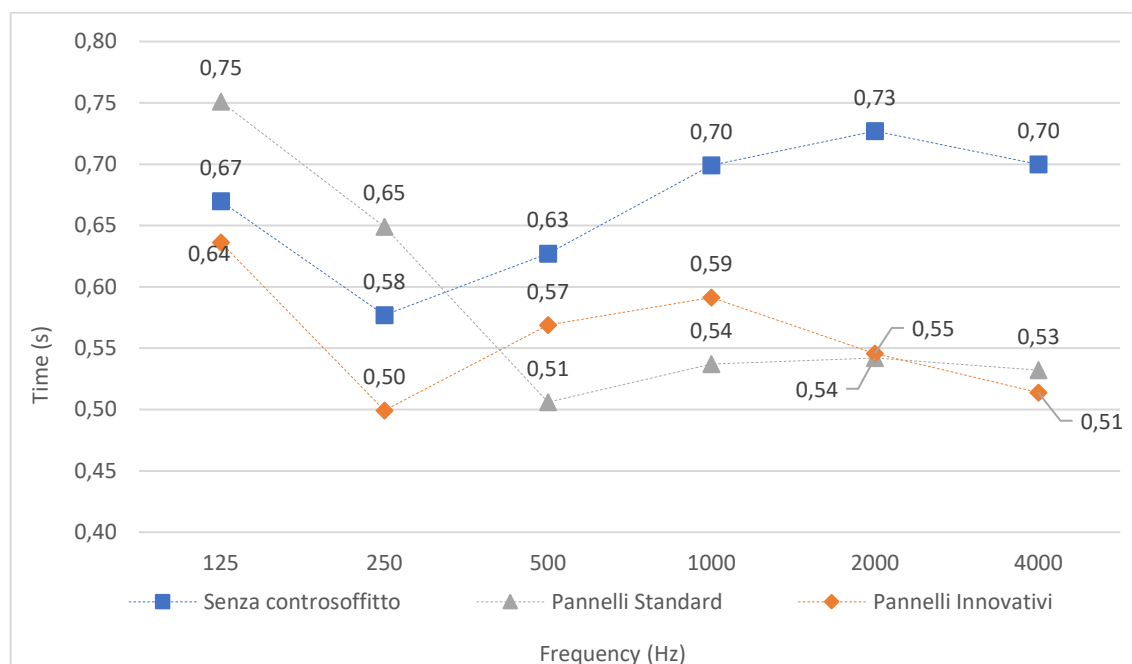


Grafico 17: Variazione in frequenza dei tempi medi di riverbero, confronto tra le tre tipologie di misurazione

Analizzando i dati ottenuti dalla prima prova, che è stata condotta senza la presenza del controsoffitto, si osserva che nell'intervallo di frequenza compreso tra 500 e 4000 Hz, i valori sono notevolmente superiori rispetto alle prove effettuate con l'uso dei pannelli. Tuttavia, per quanto riguarda le frequenze più basse, comprese tra 125 e 250 Hz, i valori si collocano tra quelli relativi ai pannelli standard e quelli relativi ai pannelli innovativi.

Effettuando un confronto tra i risultati, possiamo notare che le principali differenze tra i pannelli standard e quelli innovativi si manifestano principalmente nelle bande di frequenza più basse, specificamente tra i 125 e i 250 Hz, con valori notevolmente inferiori nella seconda configurazione. Per quanto riguarda le frequenze più elevate, comprese fino a 4000 Hz, si osserva un trend che si inverte nell'intervallo compreso tra i 500 e i 1000 Hz, stabilizzandosi poi con valori pressoché identici per le frequenze tra i 2000 e i 4000 Hz.

Quindi, a seguito del confronto tra la curva del tempo medio di riverbero in configurazione di controsoffitto con pannelli standard e quella relativa ai pannelli innovativi oggetto di studio, possiamo dire che si ha un buon miglioramento riguardo le basse bande di frequenza e un comportamento non rilevante alle medie e alle alte frequenze.

Per quanto riguarda la misurazione della chiarezza del parlato, la letteratura scientifica mostra come questo parametro risulti correlato al tempo di riverberazione, ossia all'aumentare del tempo di riverbero la chiarezza diminuisce, e viceversa. Infatti, andando a confrontare i valori del grafico precedente con quelli riportati nel grafico (22), notiamo come per valori bassi di tempo di riverbero corrispondono valori alti di C50.

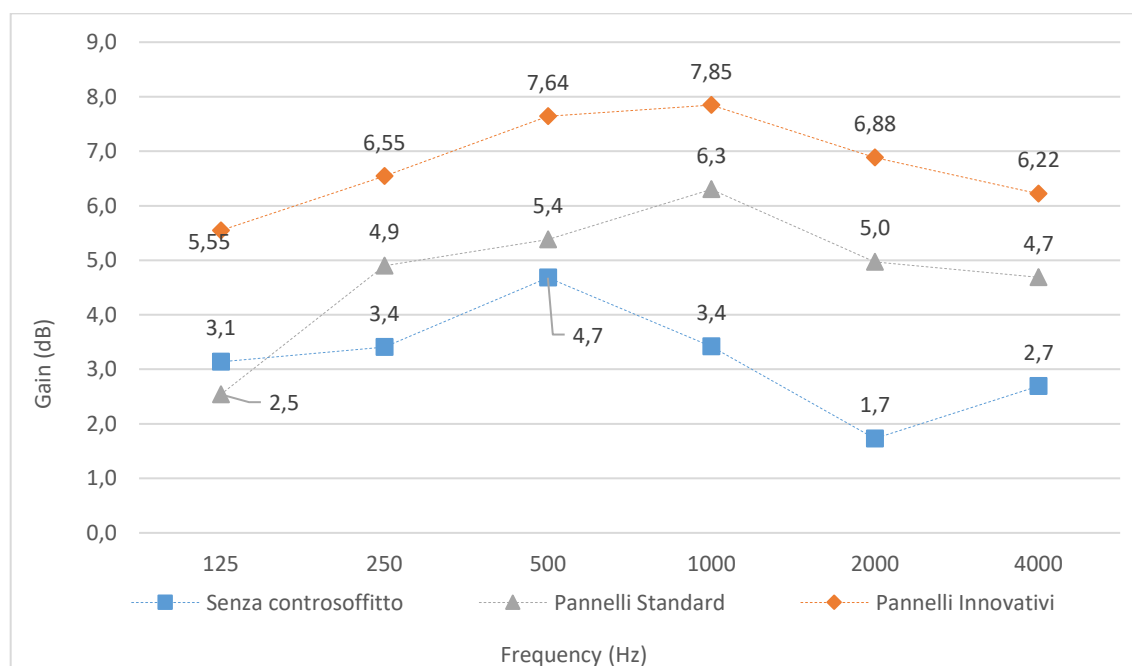


Grafico 18: Variazione in frequenza degli indici medi di chiarezza, confronto tra le tipologie di misurazione

Nello specifico possiamo notare come la configurazione dotata di pannelli innovativi abbia un valore di chiarezza notevolmente più elevato in riferimento sia alla prova effettuata con pannelli standard, sia alla prima prova dove il controsoffitto non è previsto.

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 sulle capacità acustiche.

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. Per quanto riguarda l'aspetto acustico, alla luce dei promettenti risultati ottenuti sperimentalmente che supportano la continuazione della ricerca, si procederà con un approfondimento relativo alle ulteriori posizioni di applicazione dei pannelli. Gli sviluppi futuri riguarderanno sia la valutazione delle altezze ottimali da adottare per il controsoffitto in relazione all'altezza iniziale della stanza, sia la verifica se la disposizione verticale dei pannelli sia preferibile o meno rispetto a quella orizzontale.

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] "UNI 11532-2:2020. Acustica – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di programmazione e tecniche di valutazione. Settore scolastico.”.
- [18] "UNI EN ISO 3382-2:2008. Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti. Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari.”.
- [19] "DM 11/10/2017 'Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione'.”.
- [20] "UNI EN 12354-6:2006. Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Assorbimento acustico in ambienti chiusi.”.

- [21] “UNI EN ISO 3382-1:2009 Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 1: Sale da spettacolo”.
- [22] “UNI 11532-1:2018 Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 1: Requisiti generali”.
- [23] “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

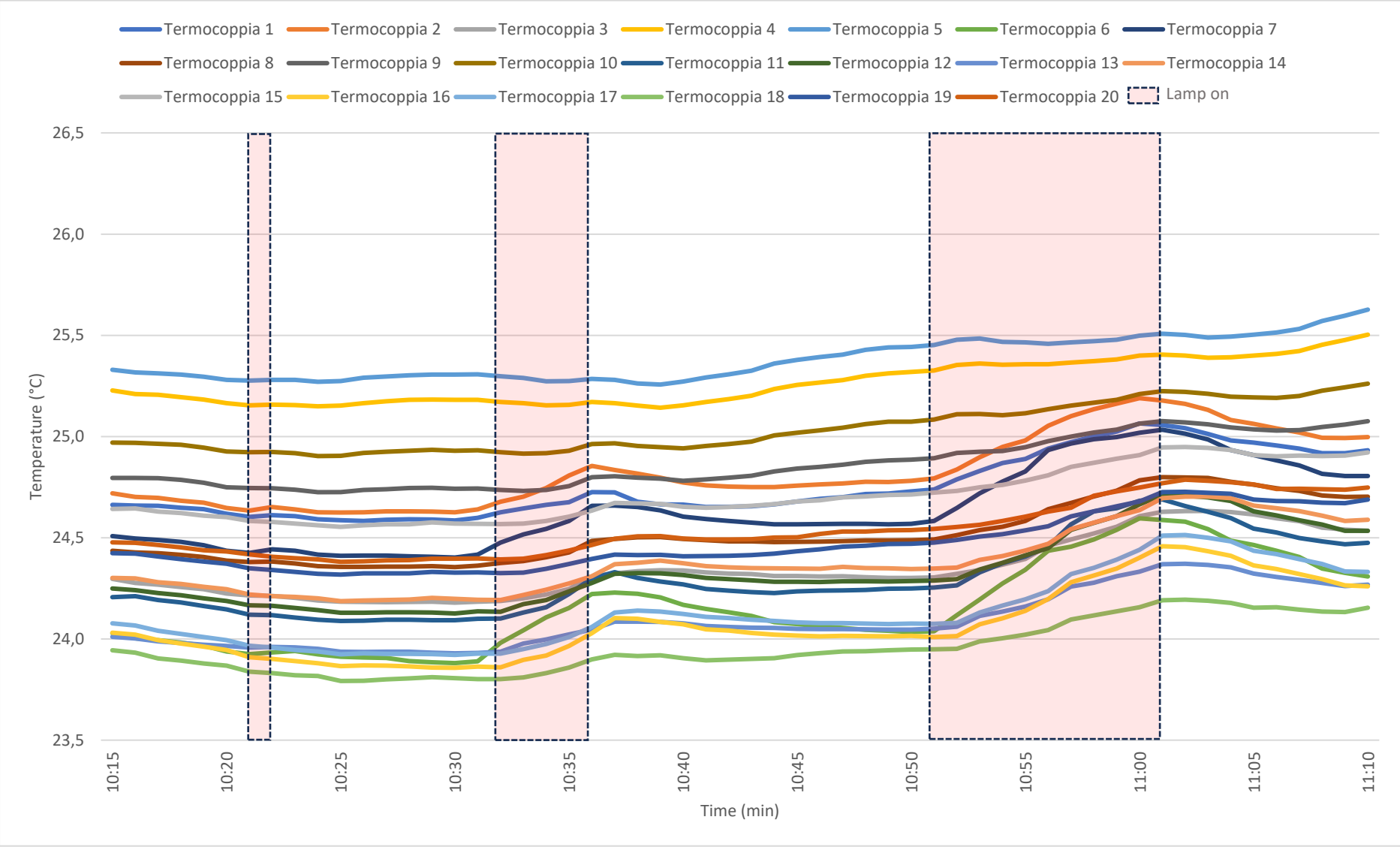


Grafico 19: Accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 1

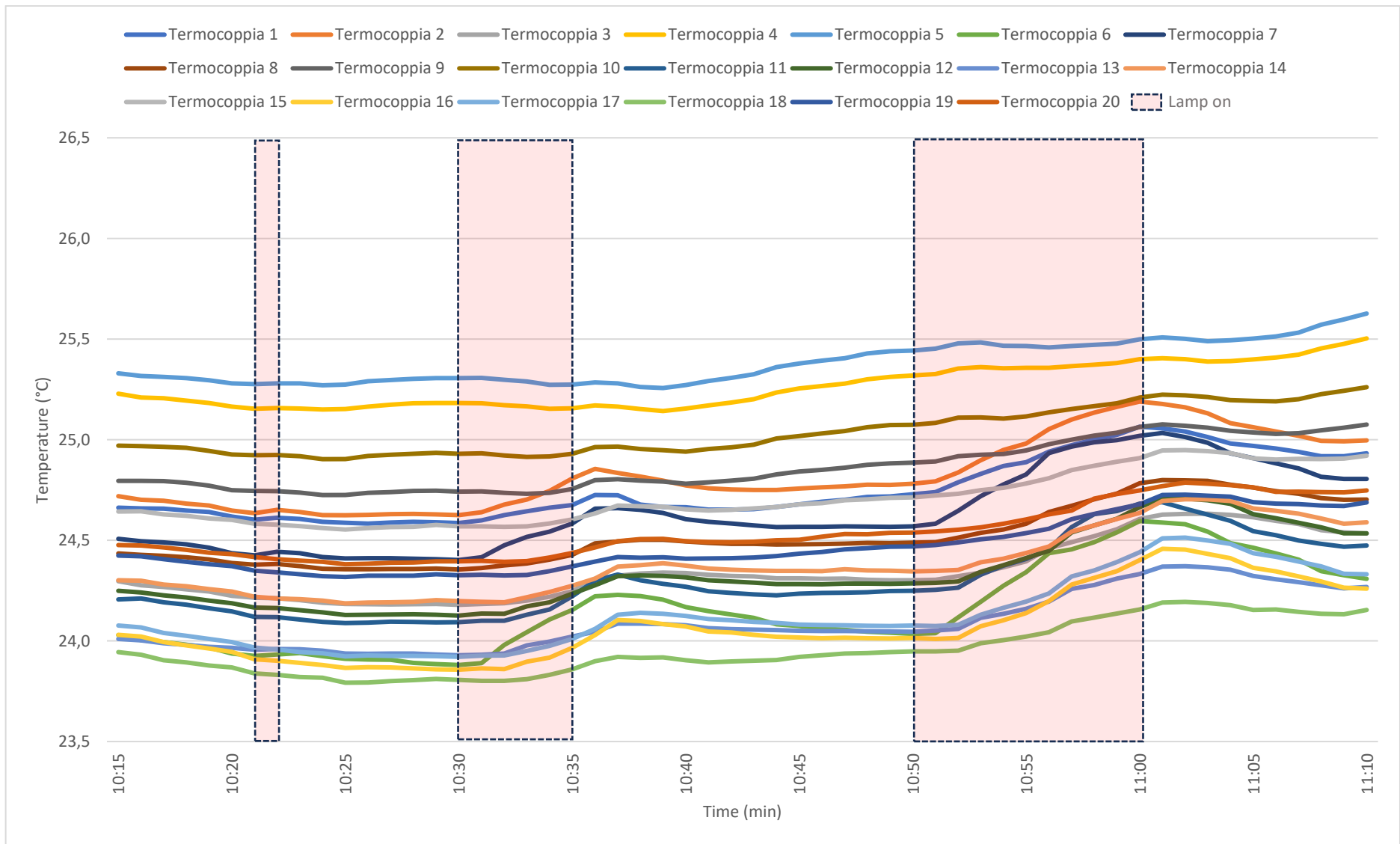


Grafico 20: Accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 2

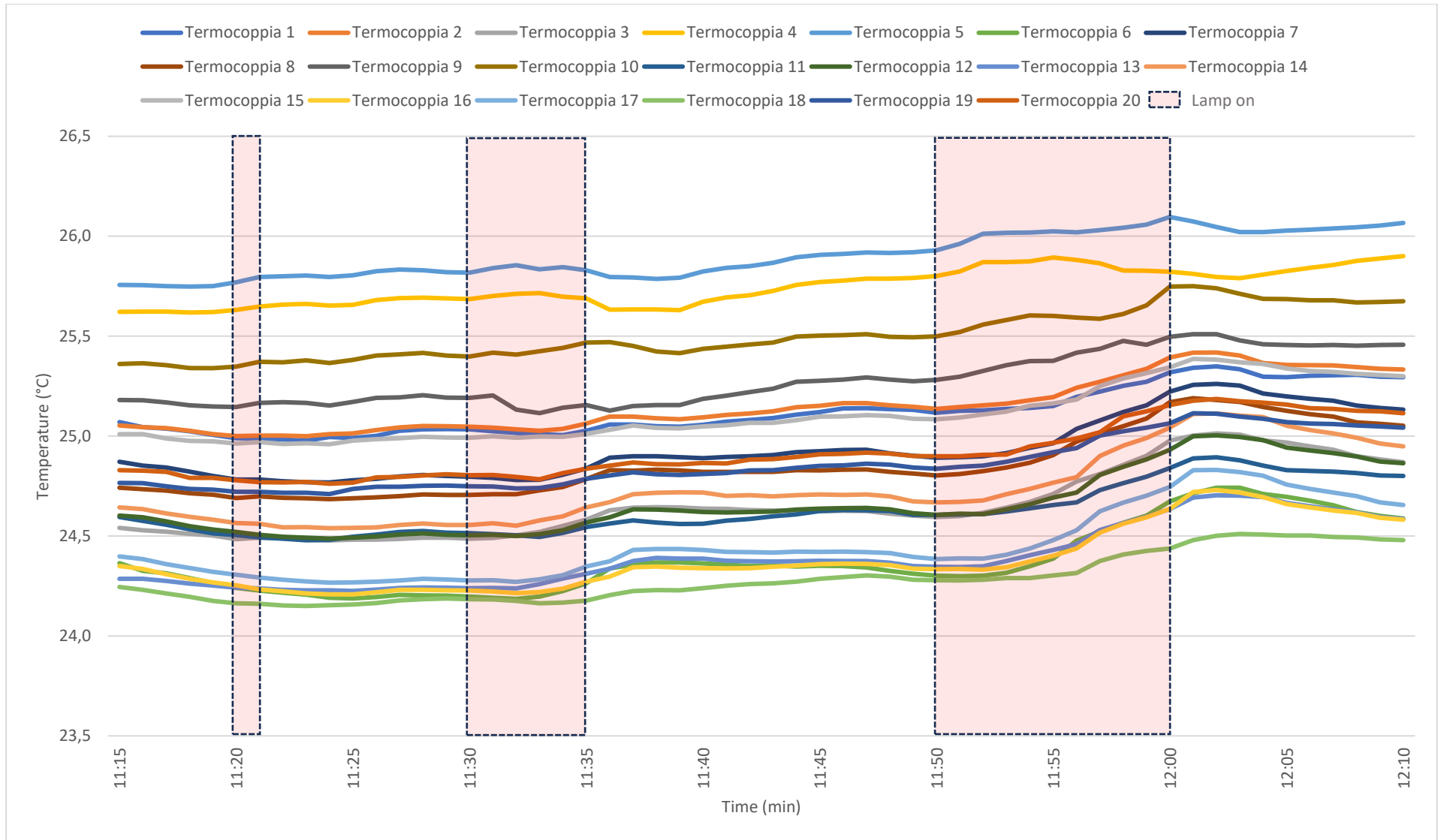


Grafico 21: Grafico 1: Accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 3

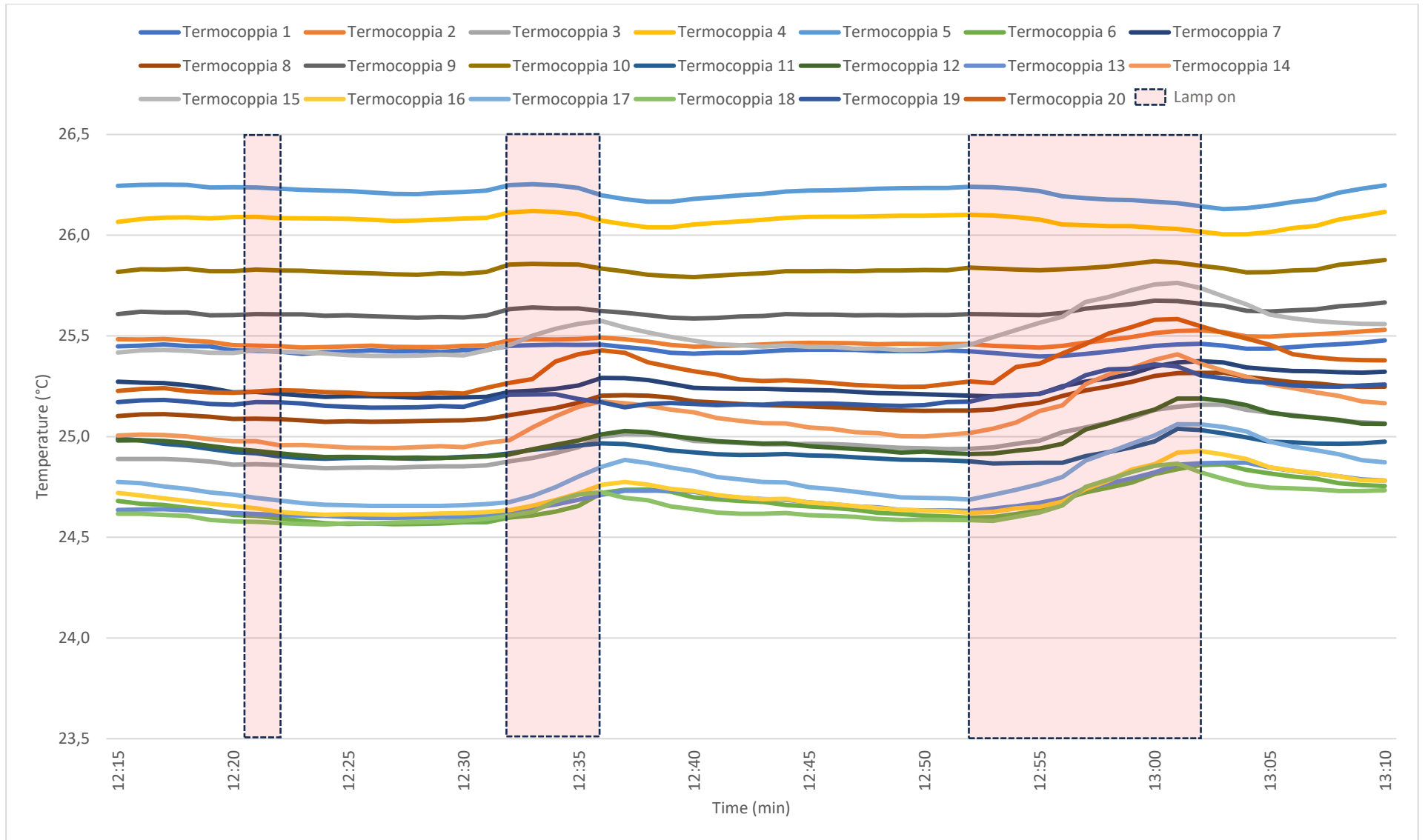


Grafico 22: Accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 4

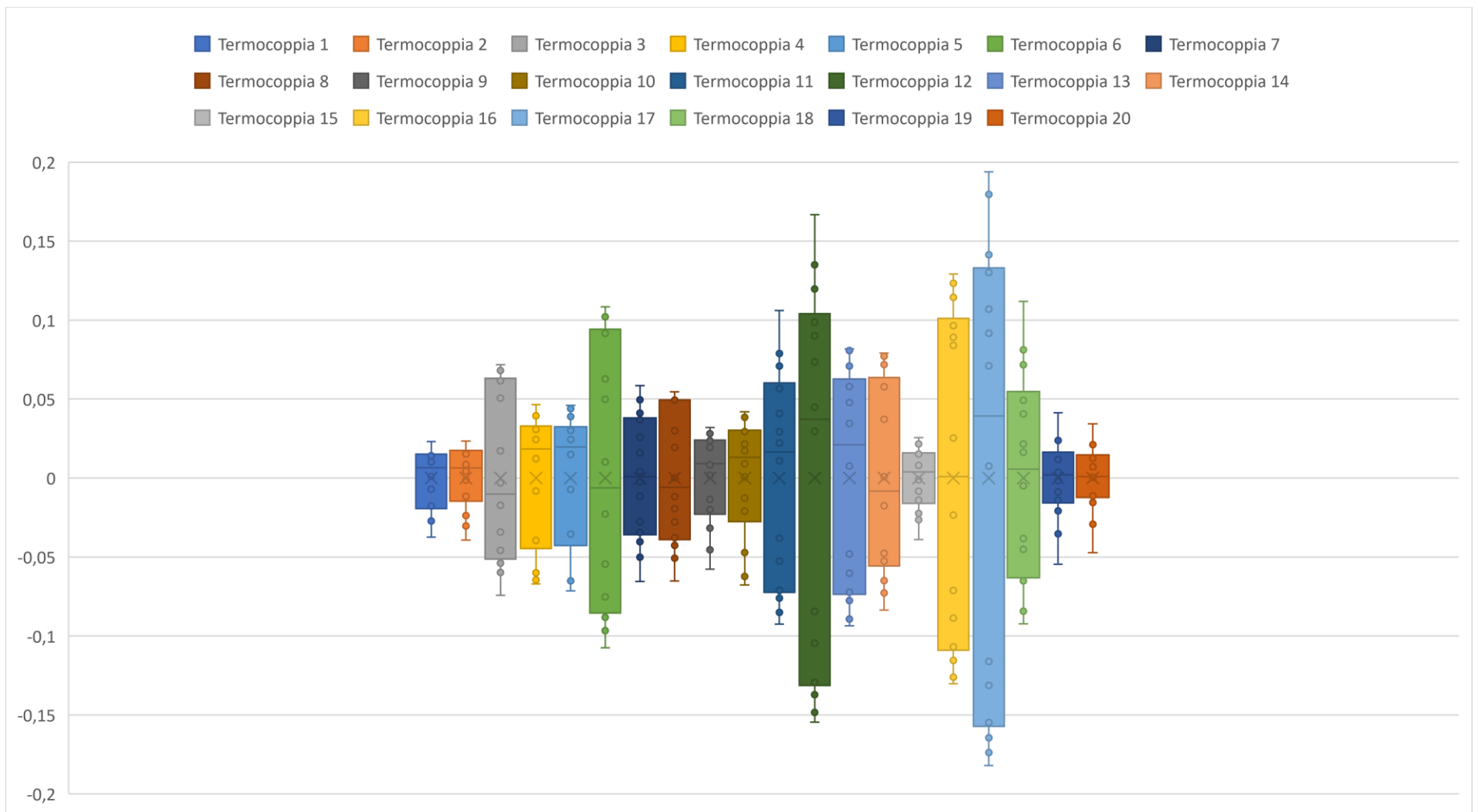


Grafico 23: Box Plot accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 1

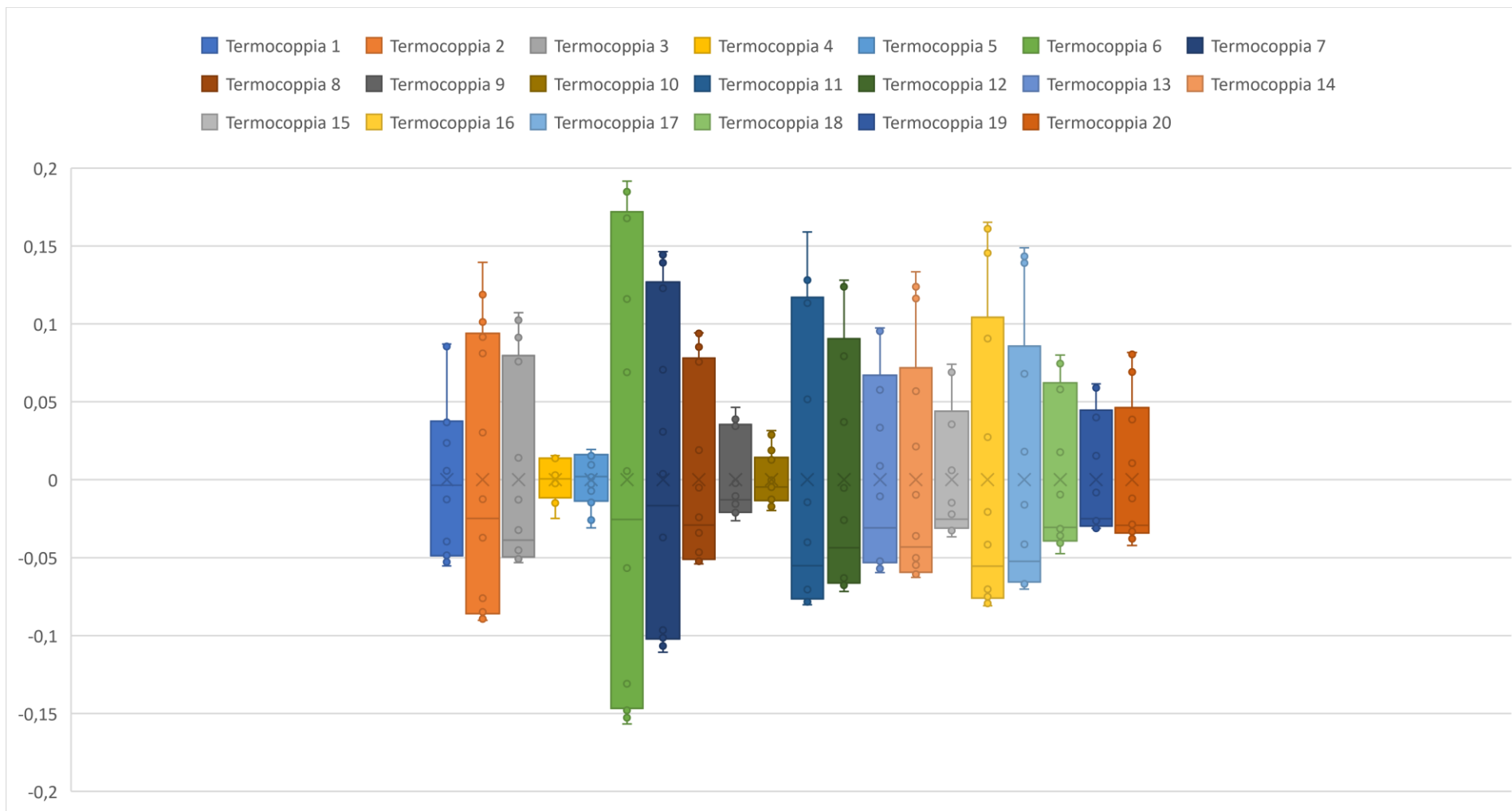


Grafico 24: Box Plot accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 2

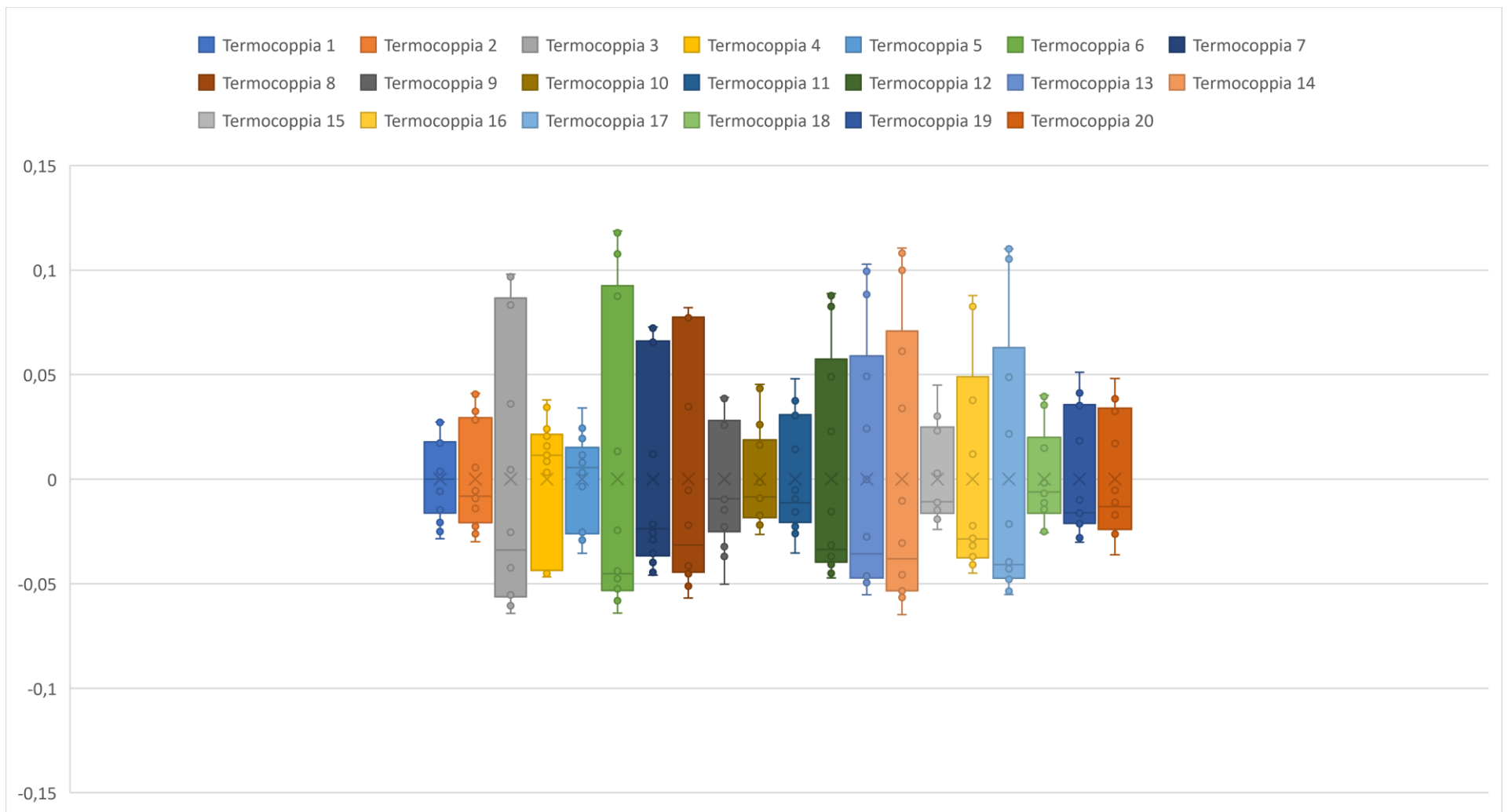


Grafico 25: Box Plot accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 3

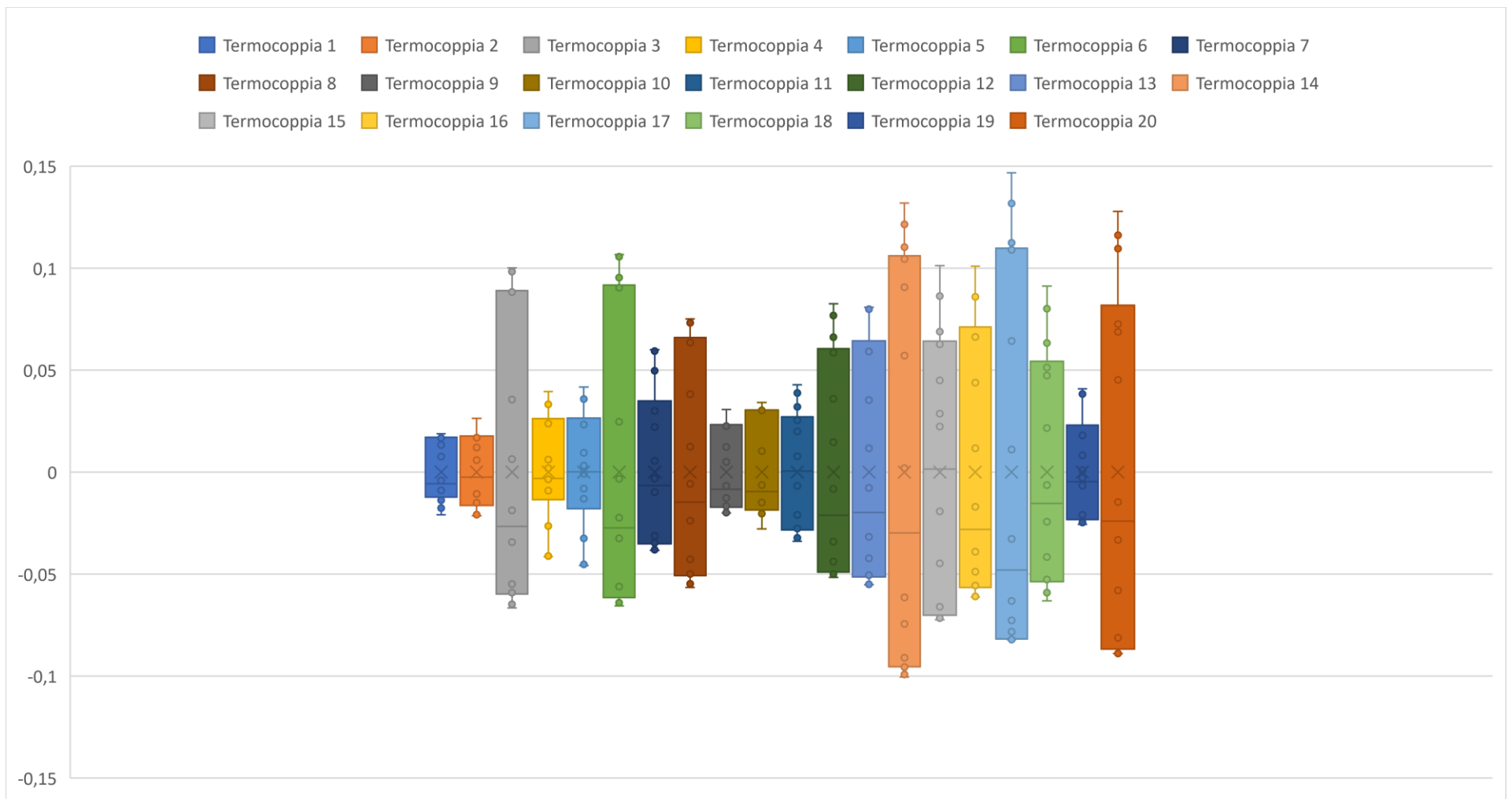


Grafico 26: Box Plot accensione lampada 1-5-10 minuti, zona 4

Appendice 2

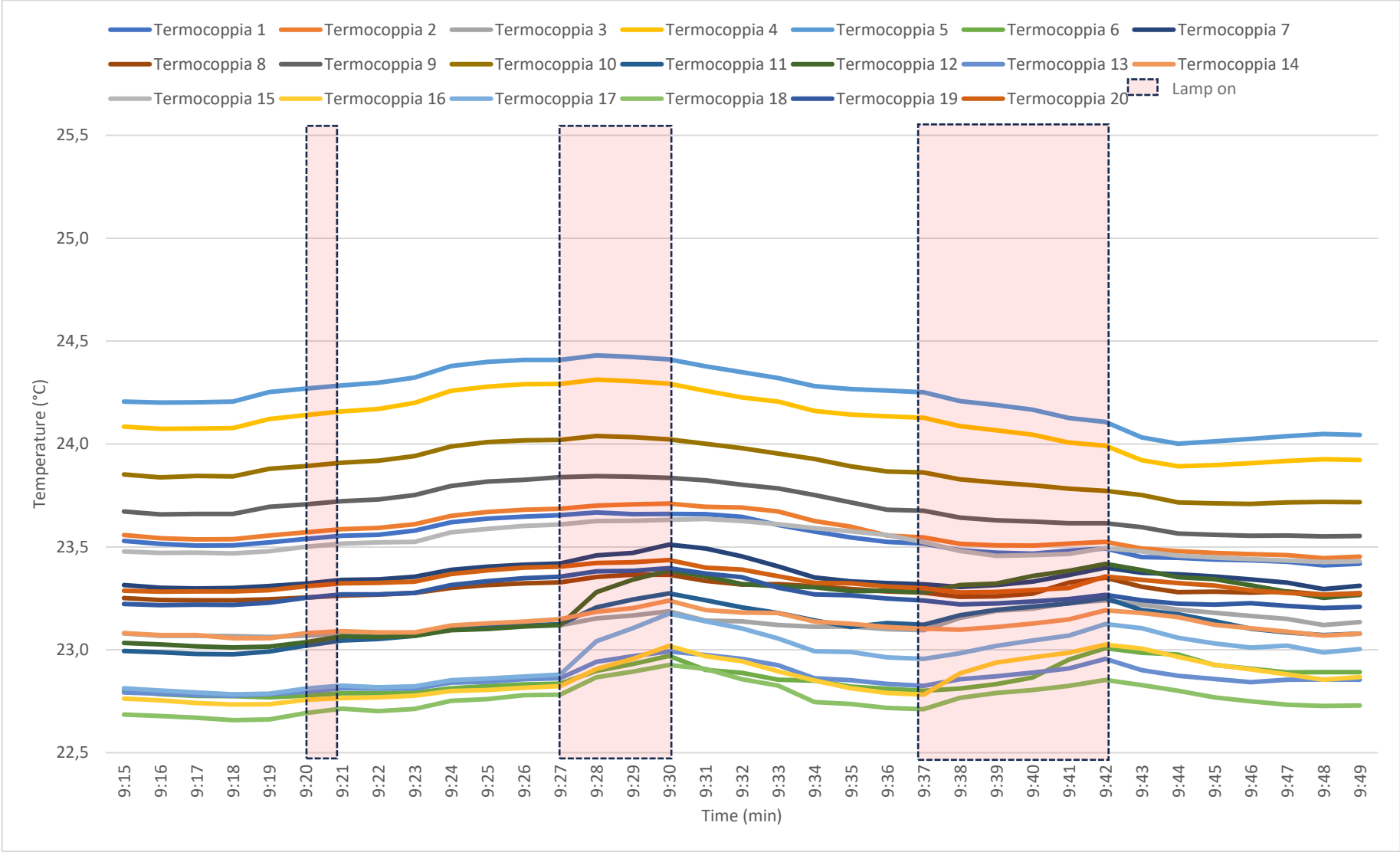


Grafico 27: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 1

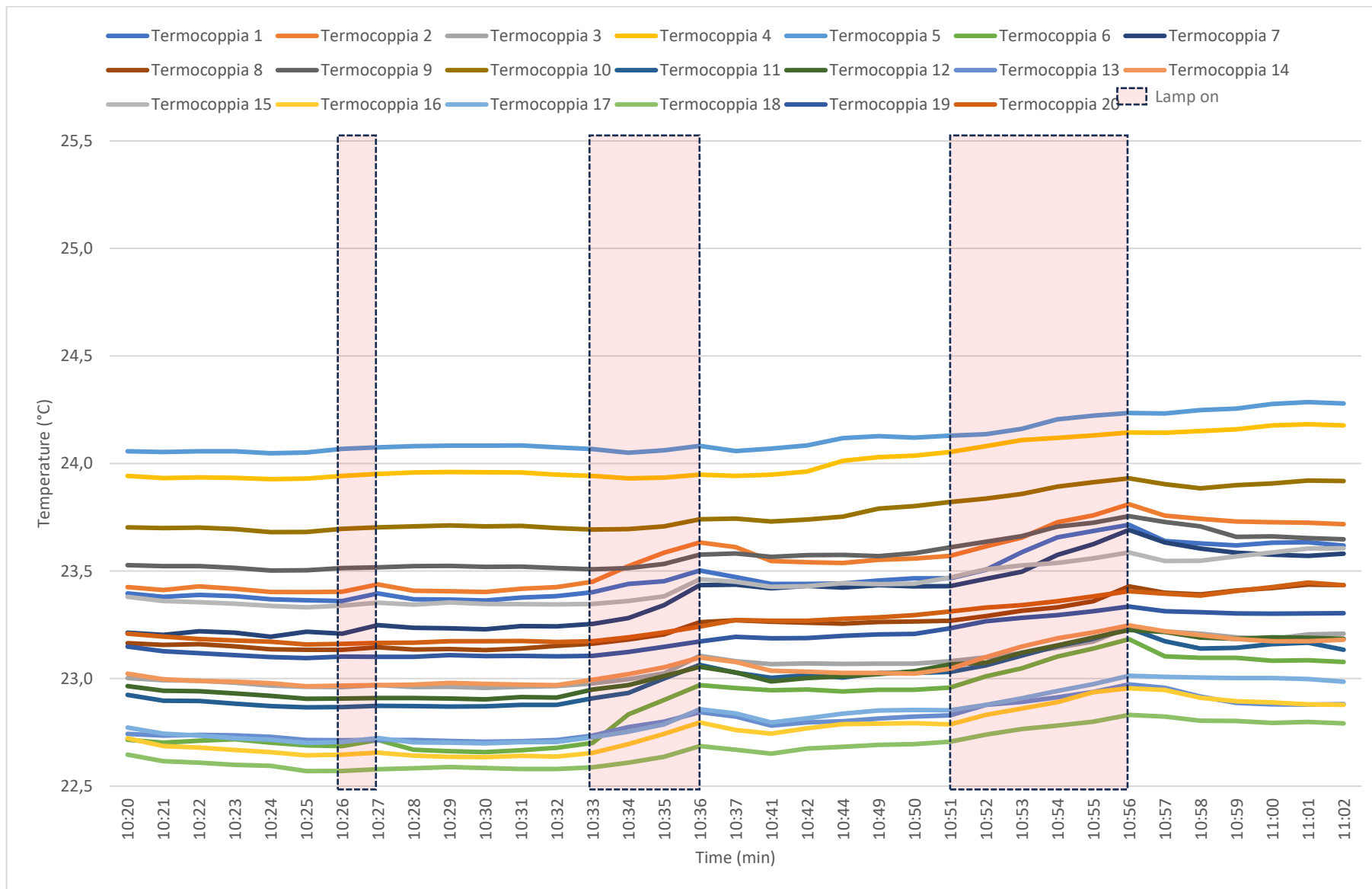


Grafico 28: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 2

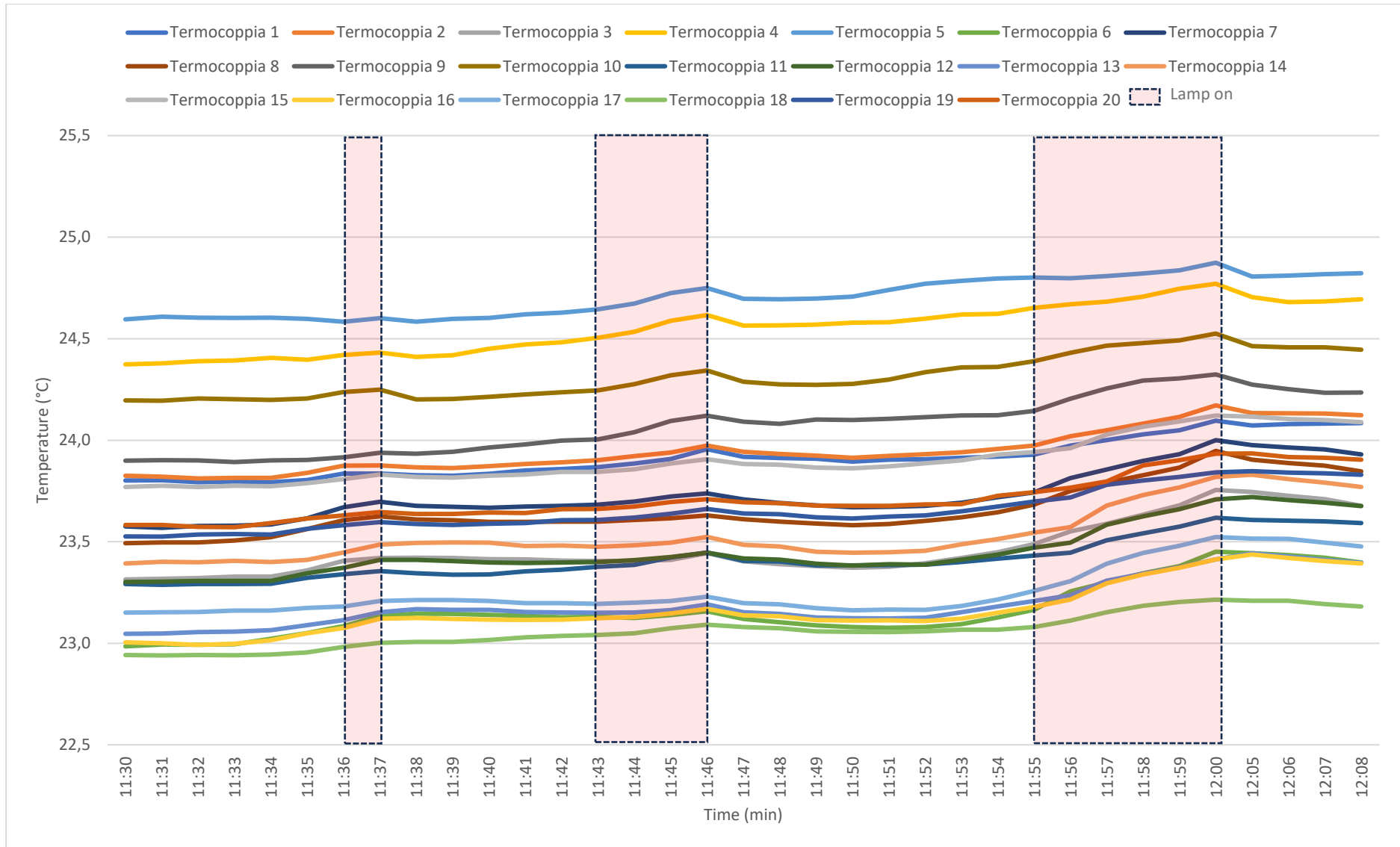


Grafico 29: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 3

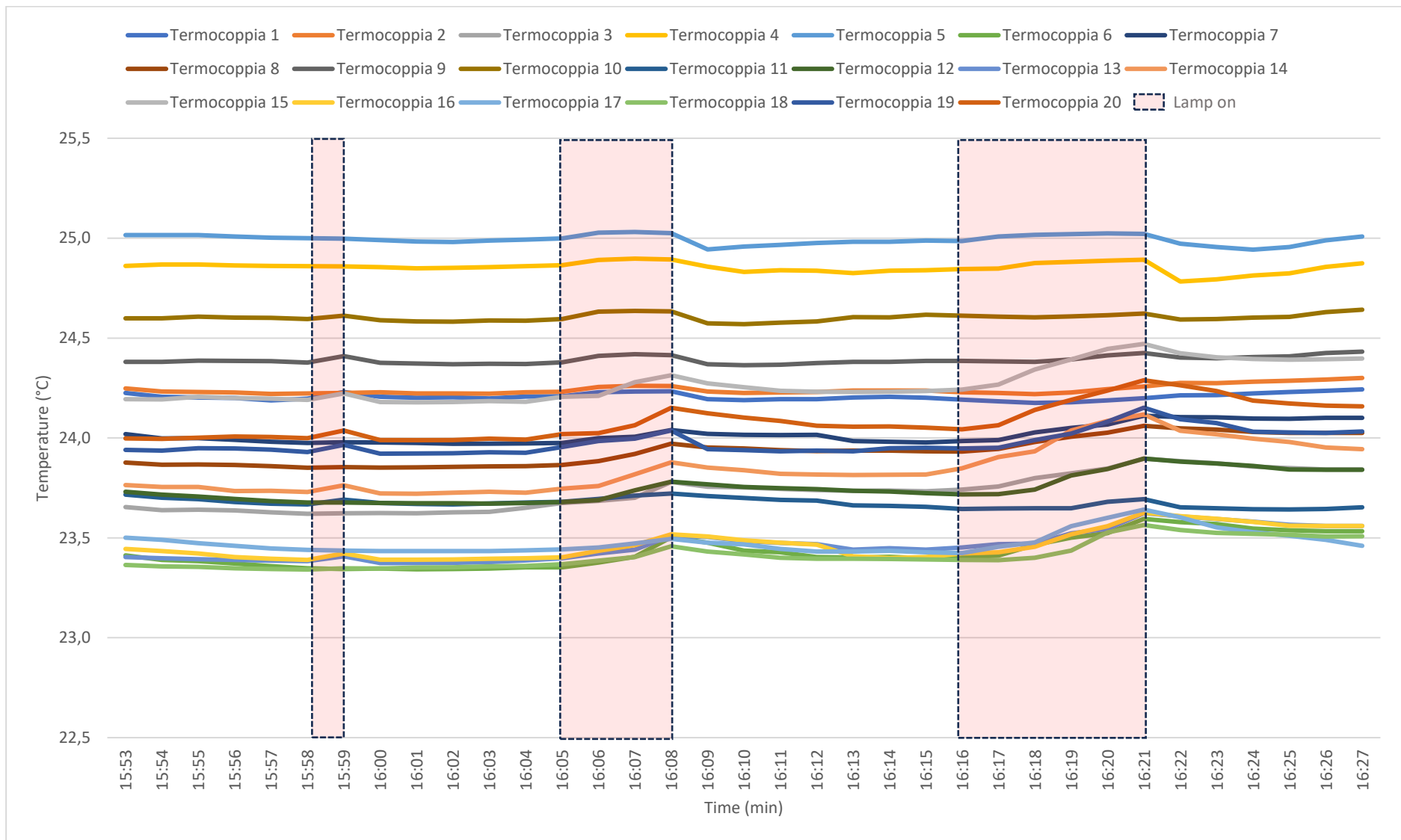


Grafico 30: Accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 4

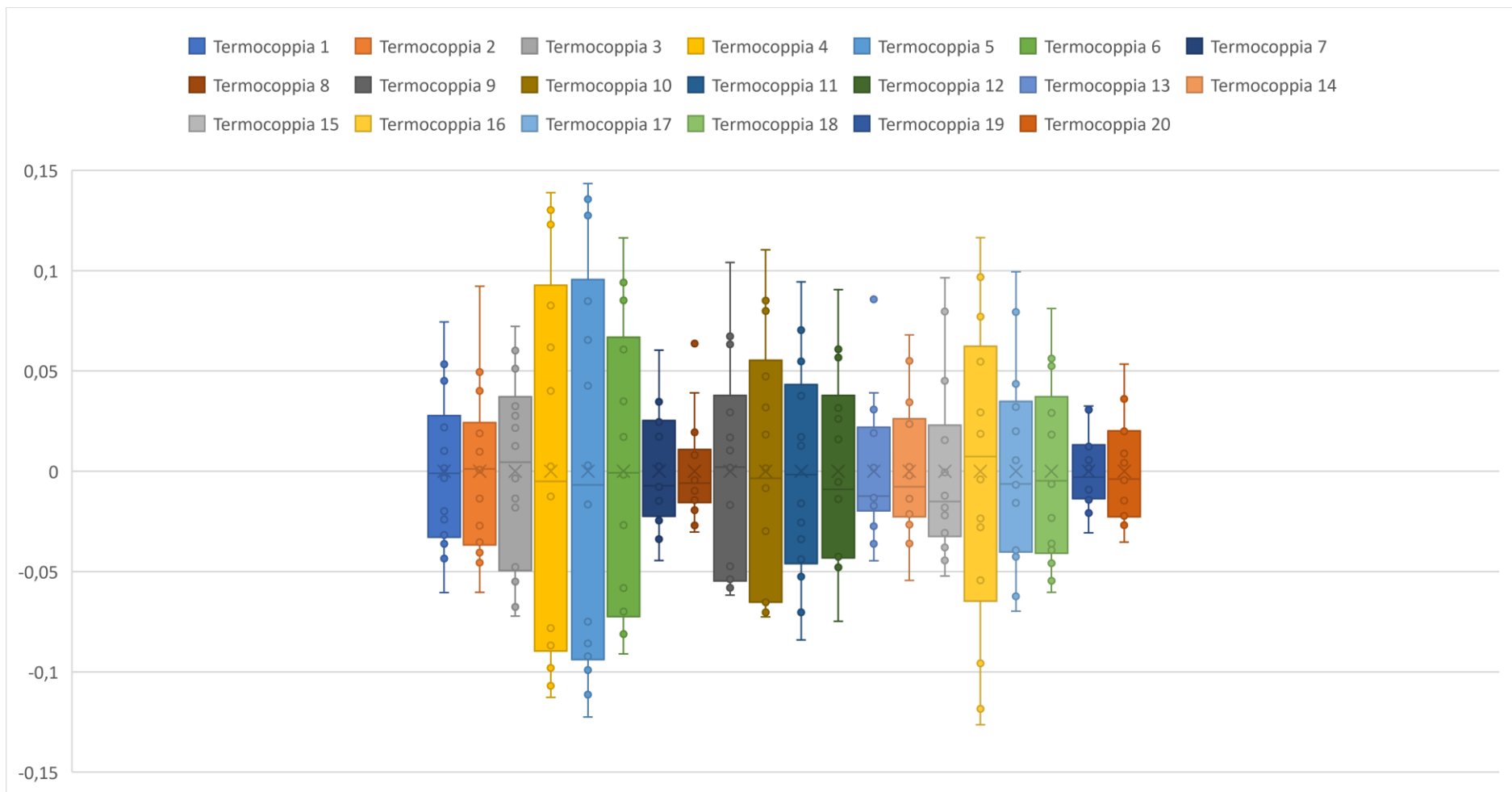


Grafico 31: Box Plot accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 1

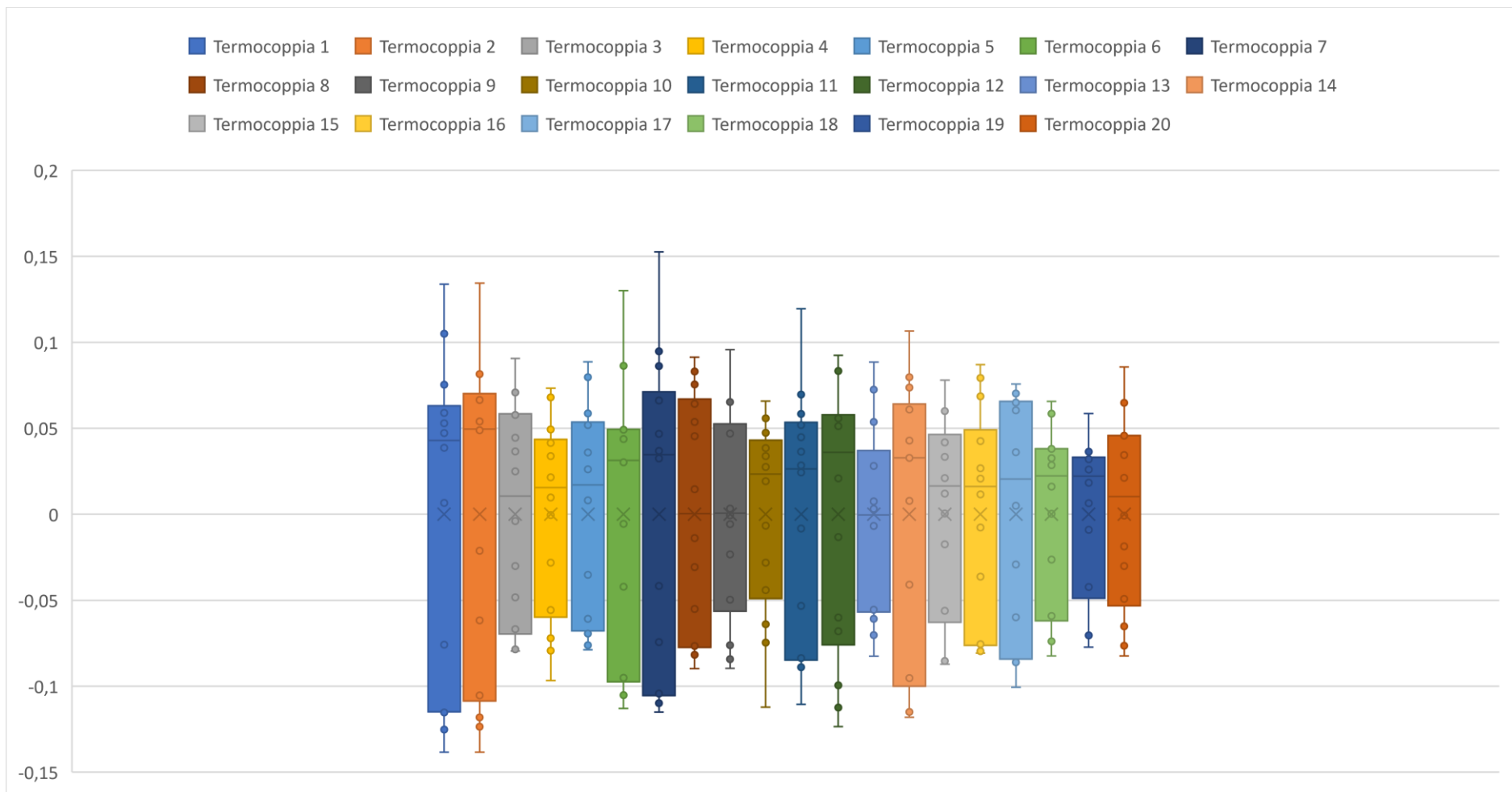


Grafico 32: Box Plot accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 2

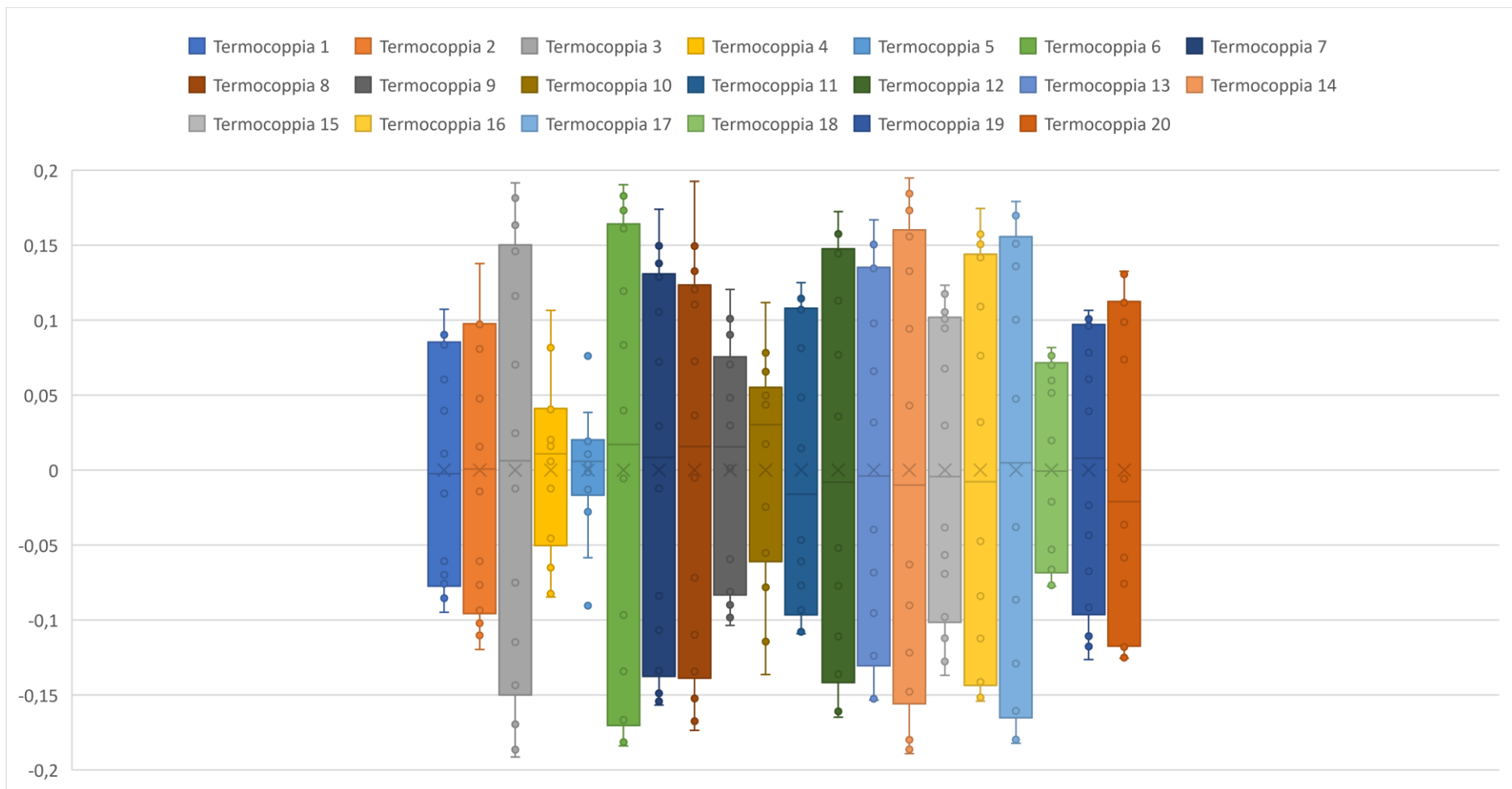


Grafico 33: Box Plot accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 3

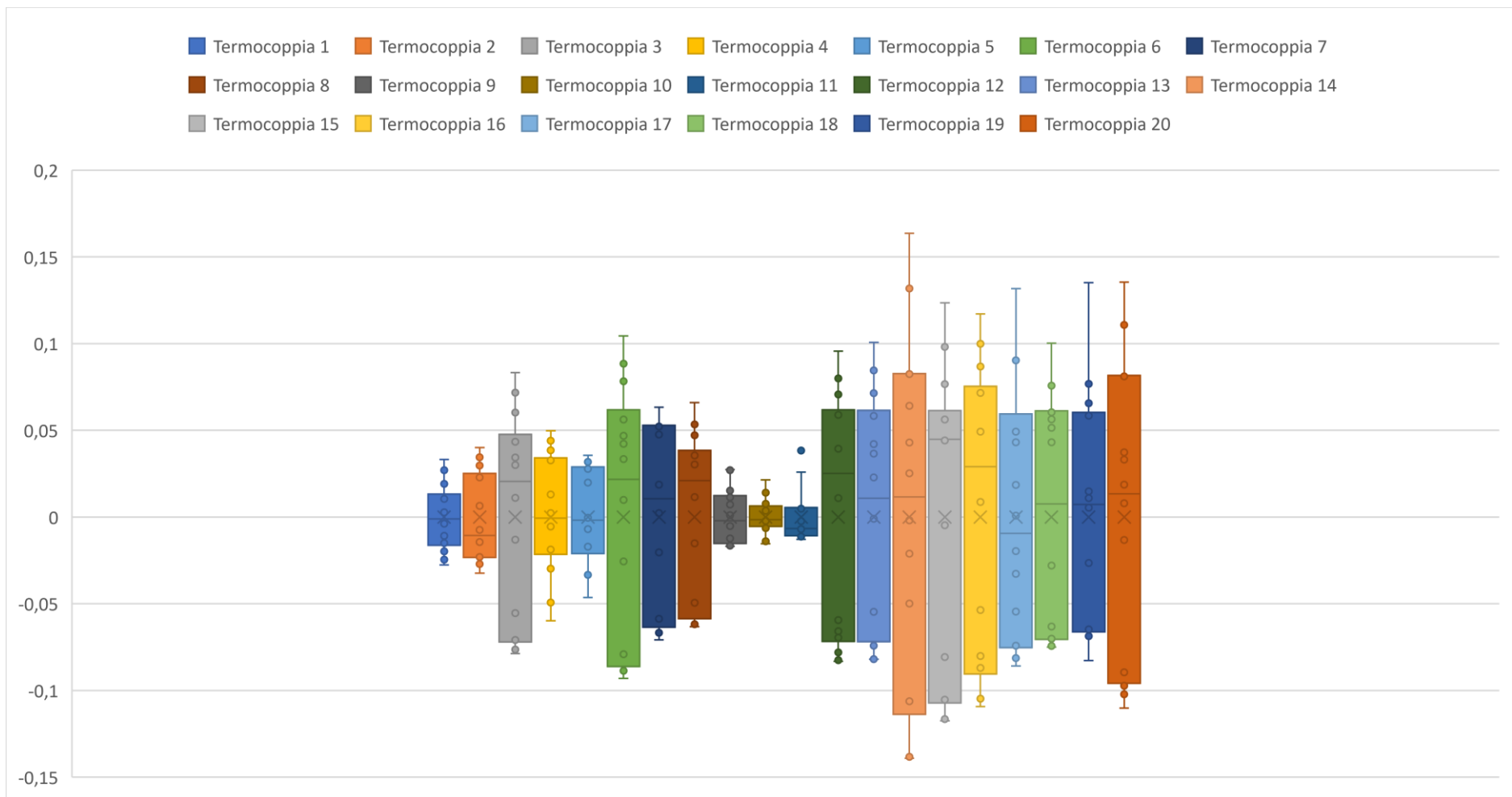
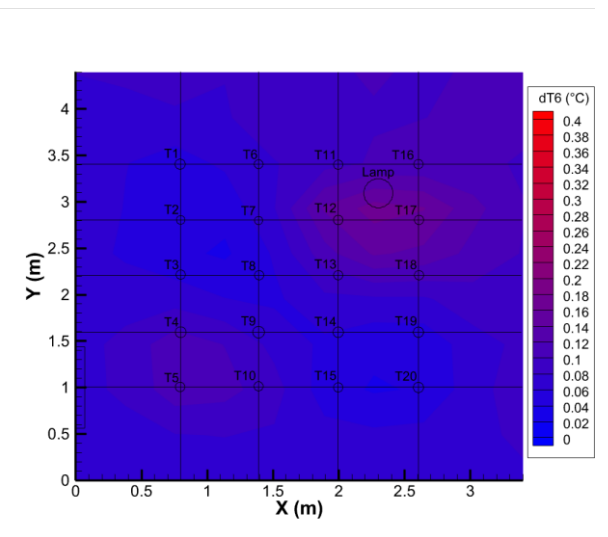
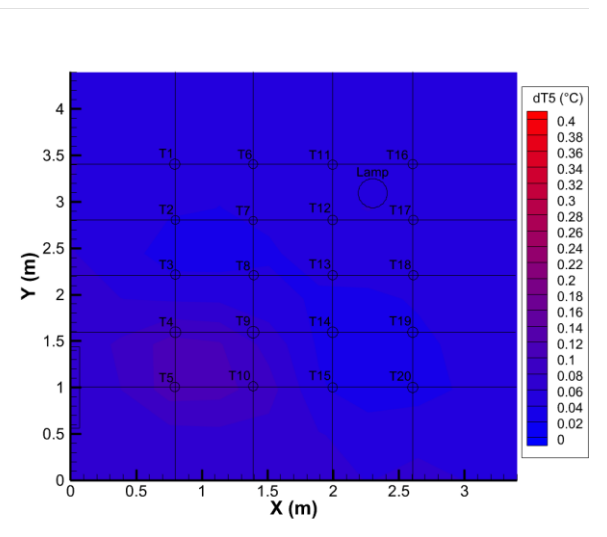
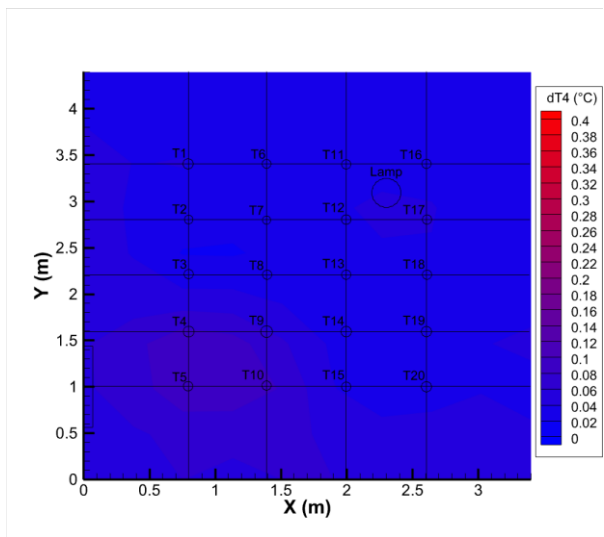
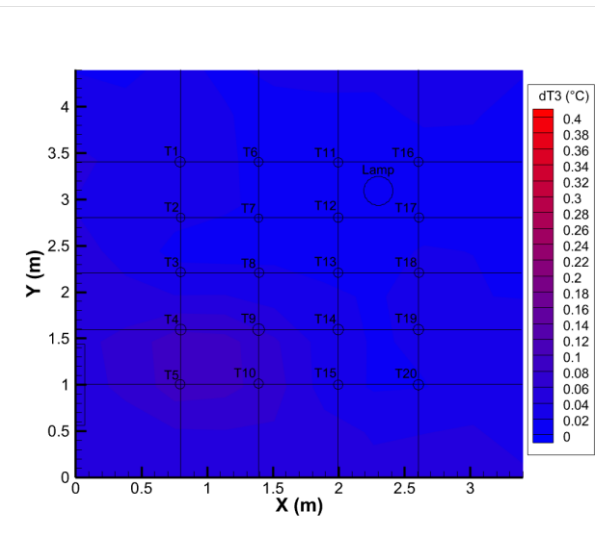
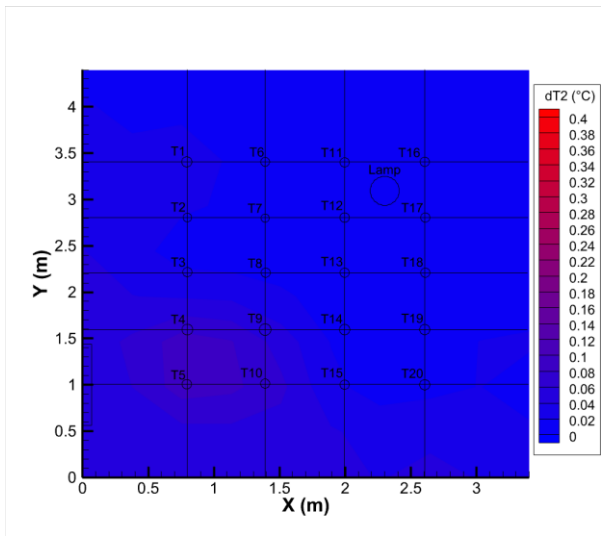
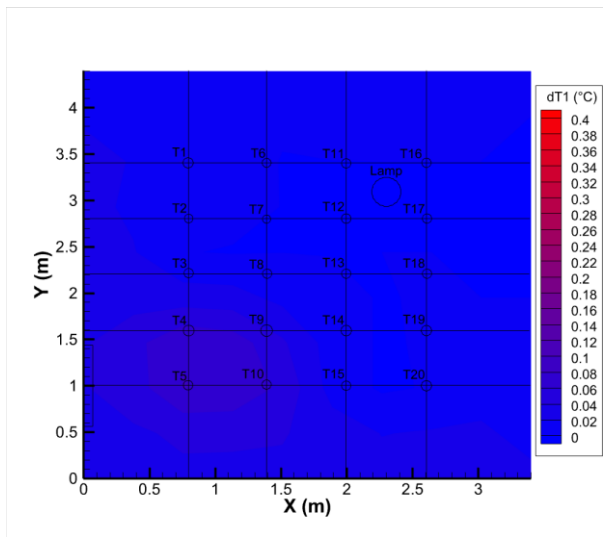
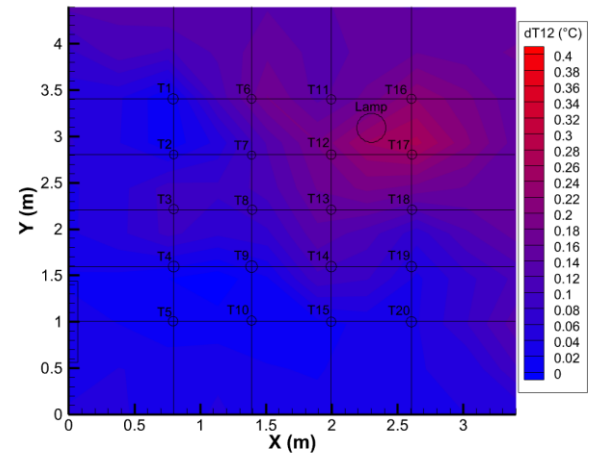
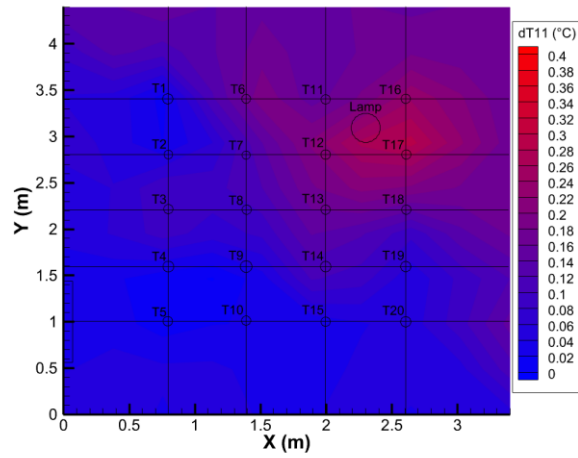
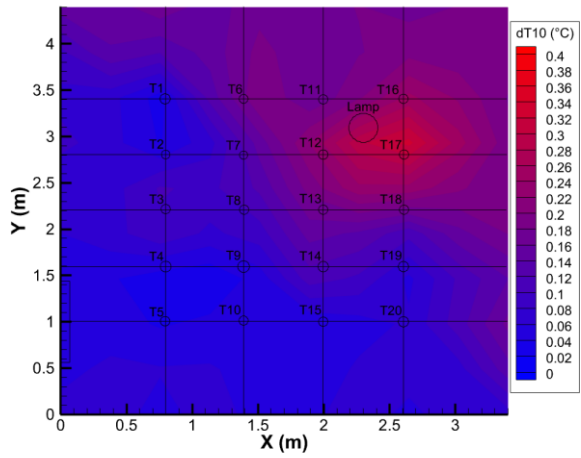
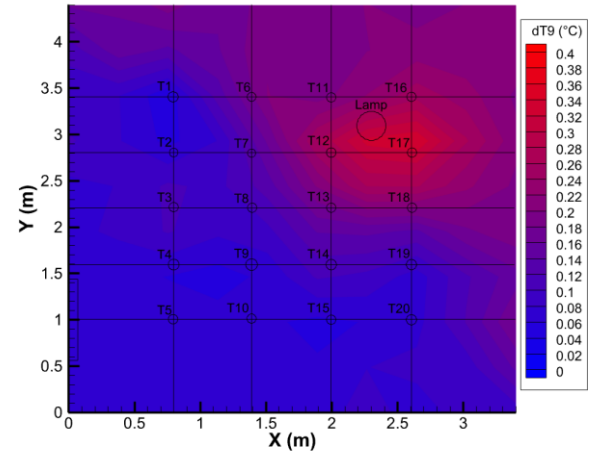
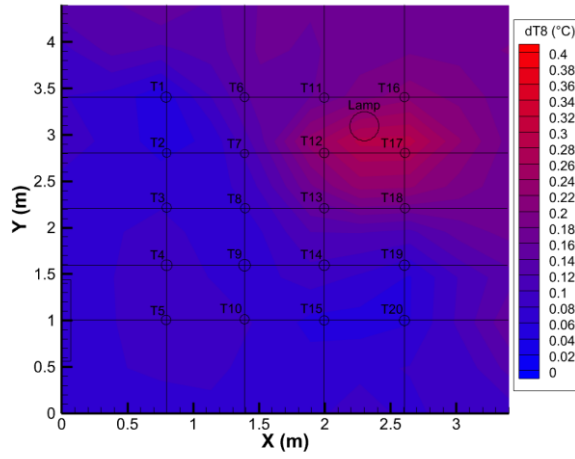
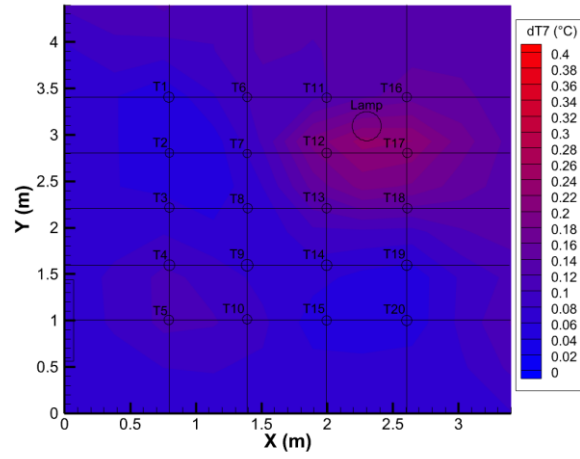


Grafico 34: Box Plot accensione lampada 1-3-5 minuti, zona 4

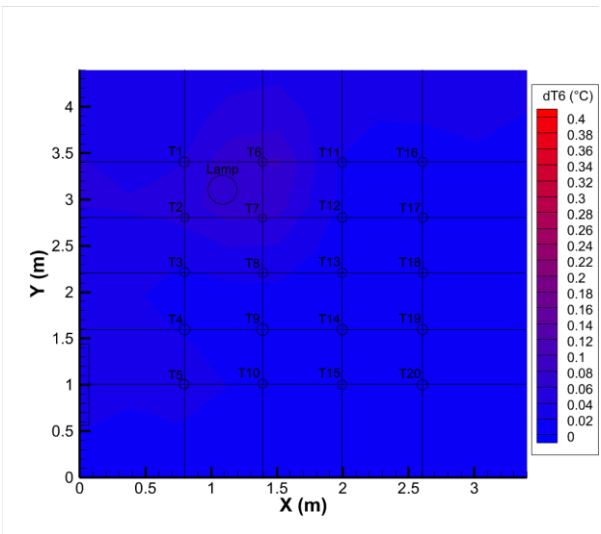
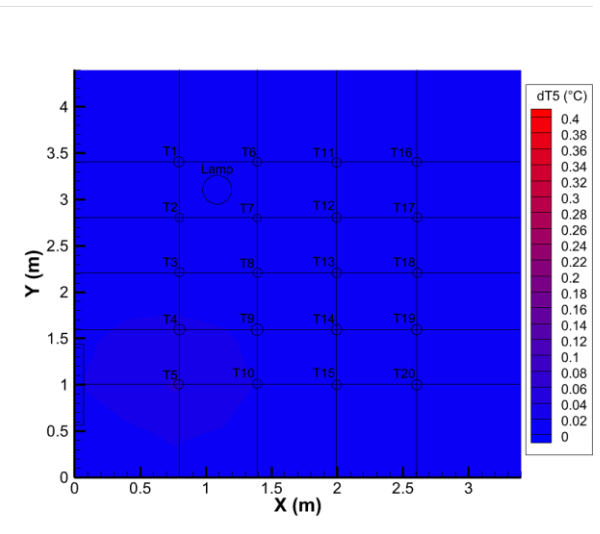
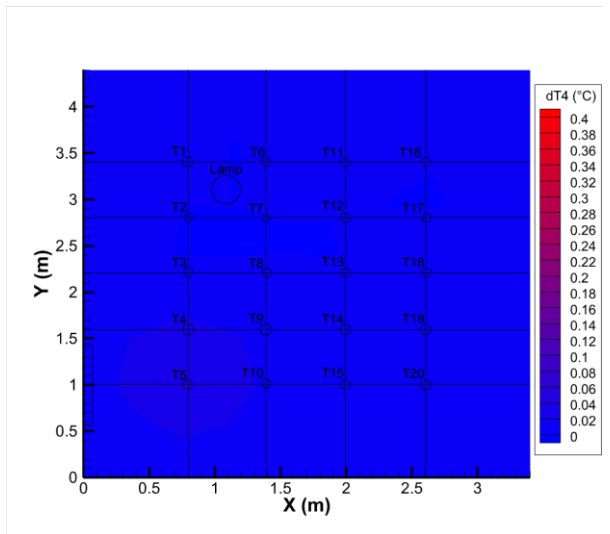
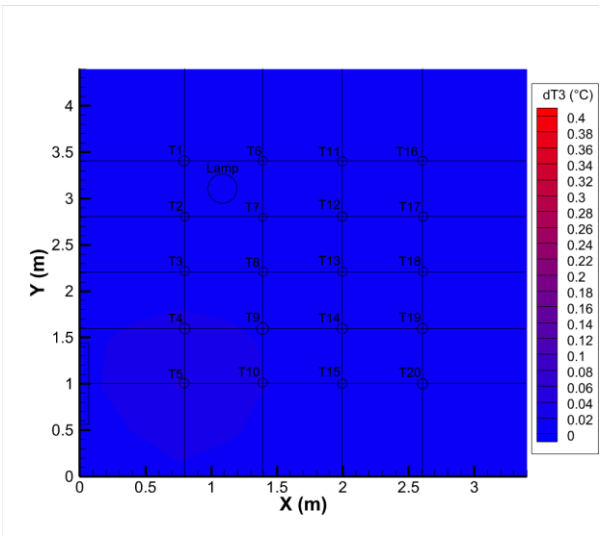
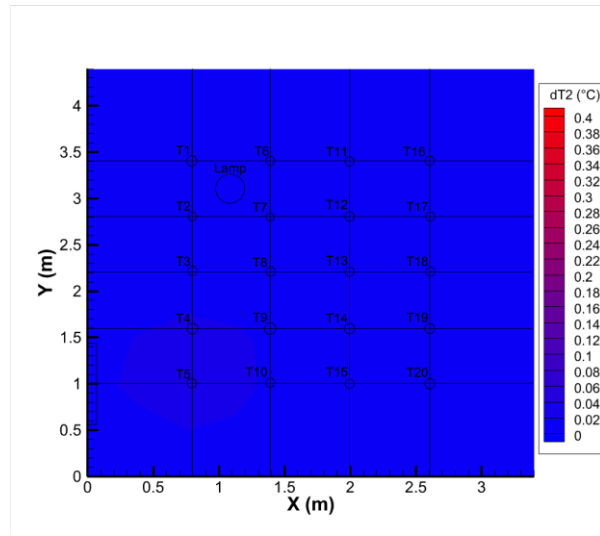
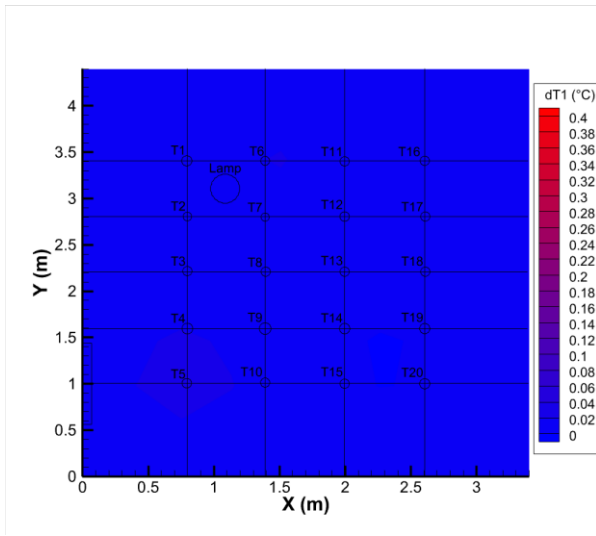
Appendice 3

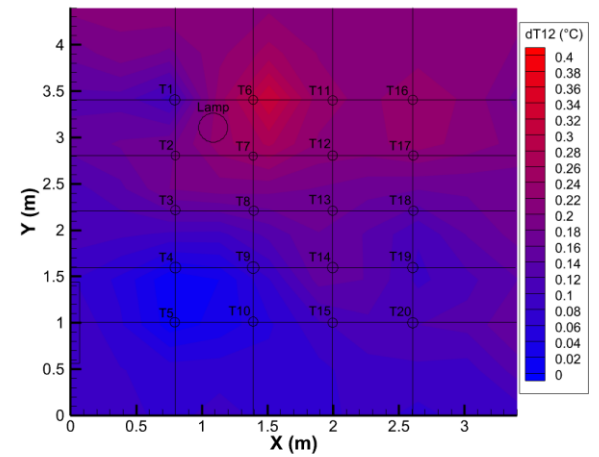
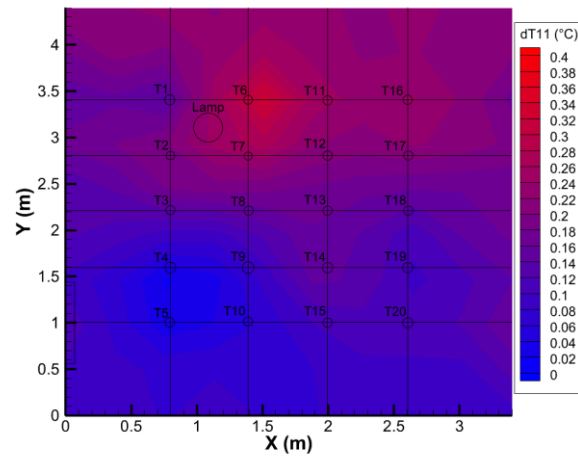
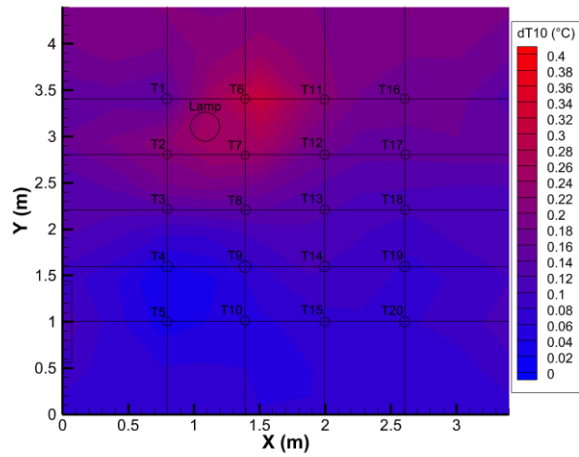
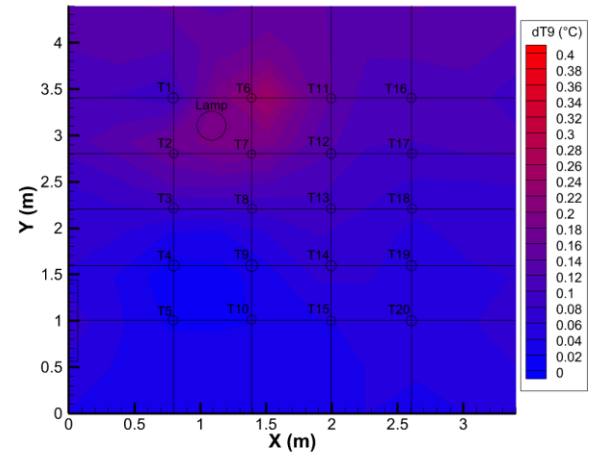
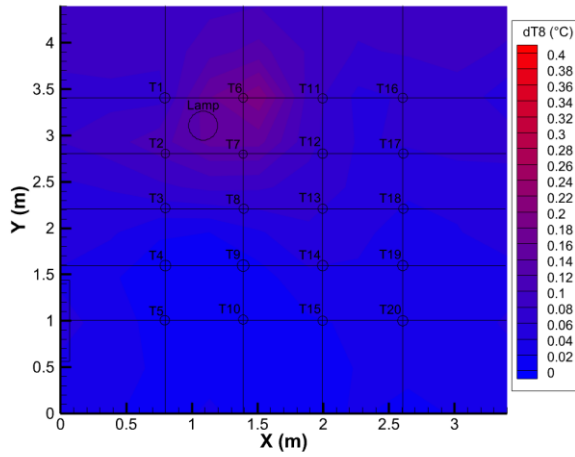
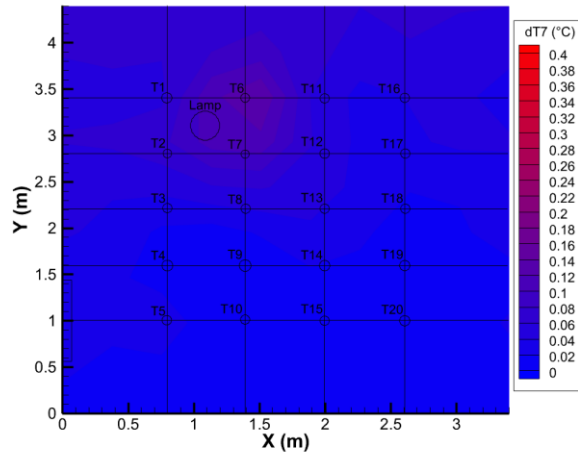
1) Prove accensione lampada per 5 minuti, zona 1



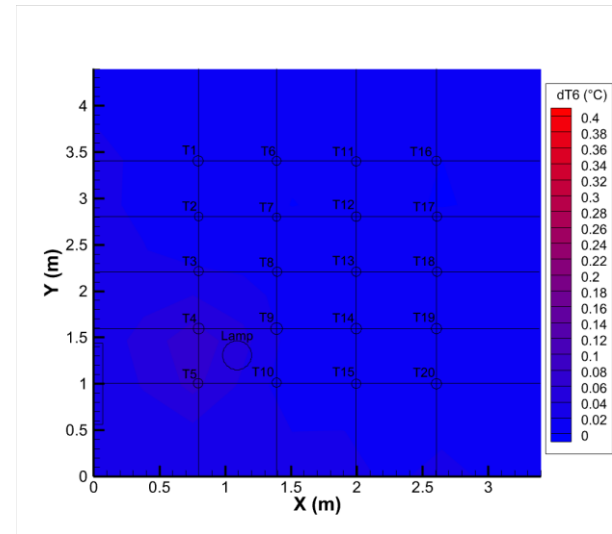
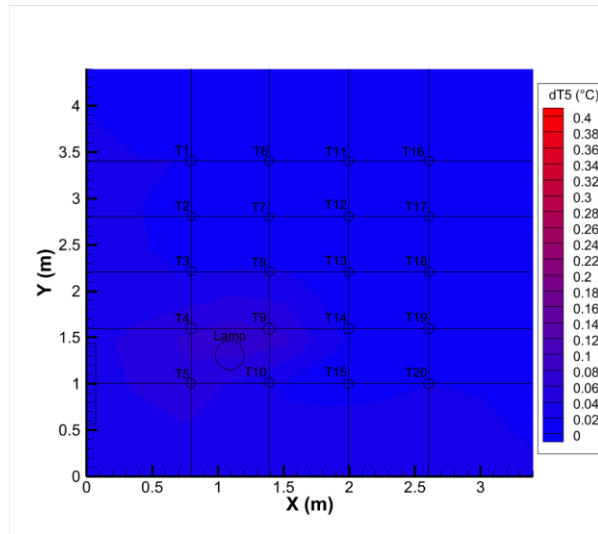
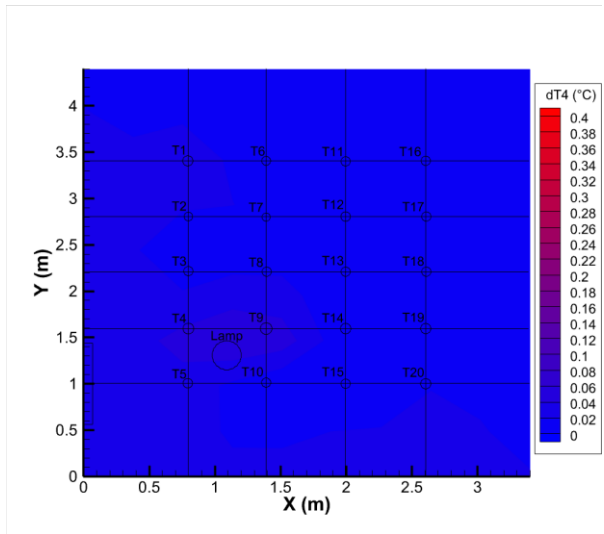
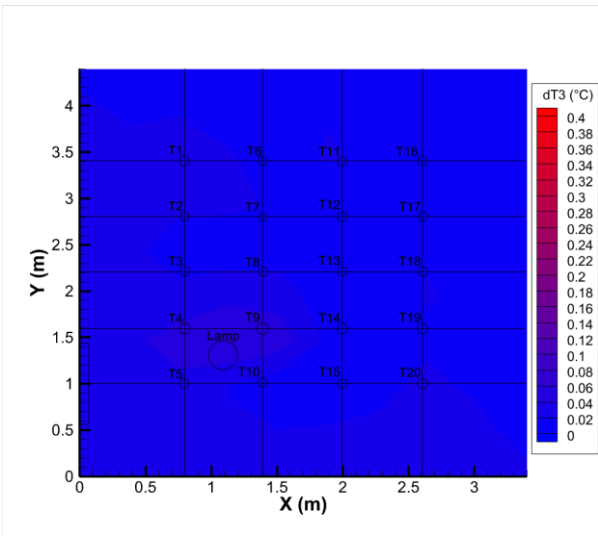
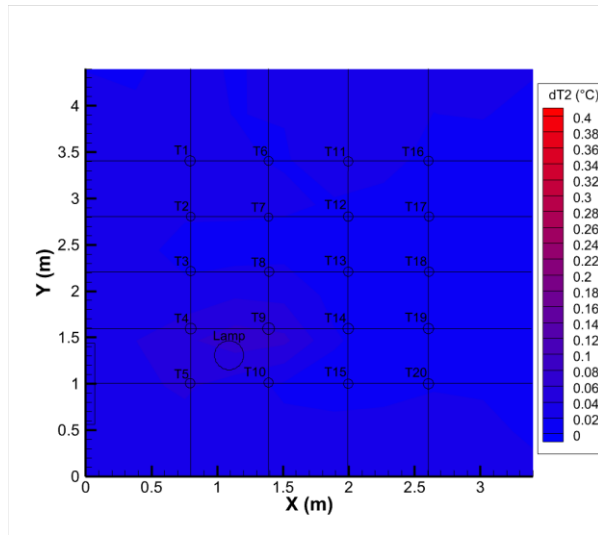
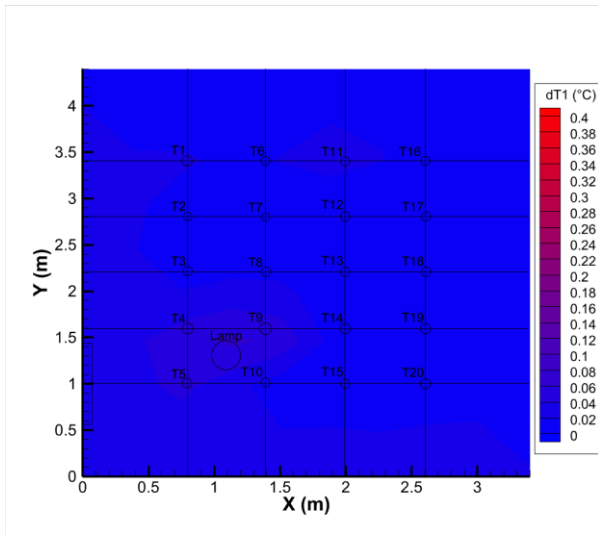


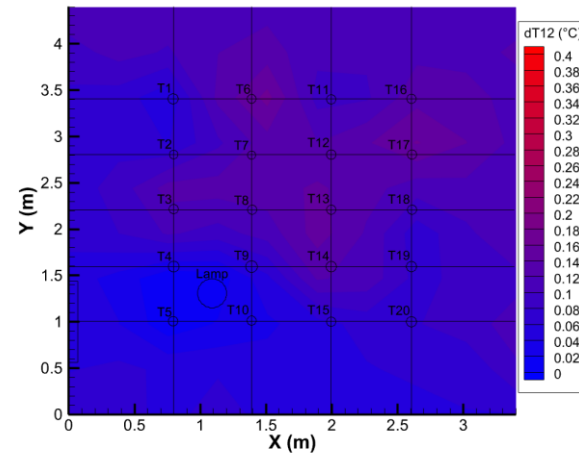
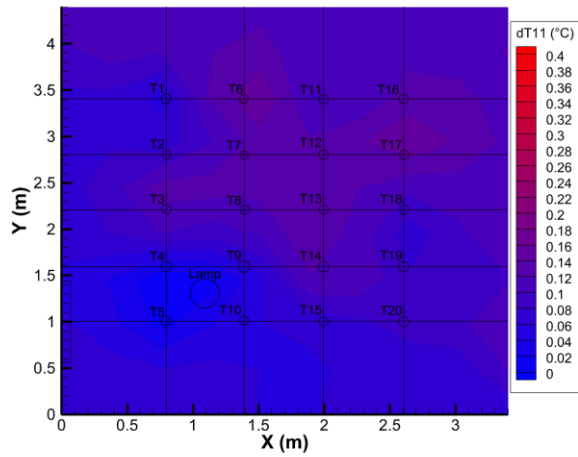
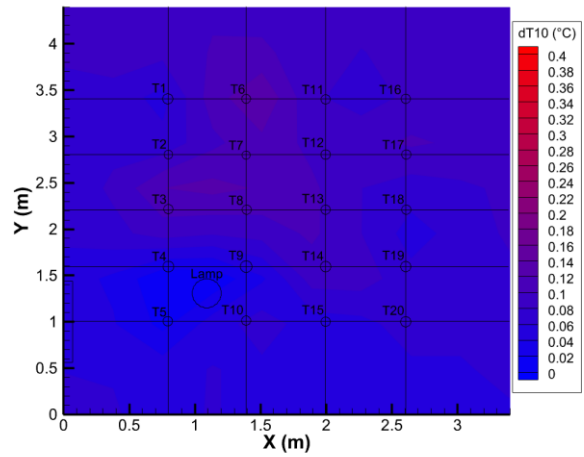
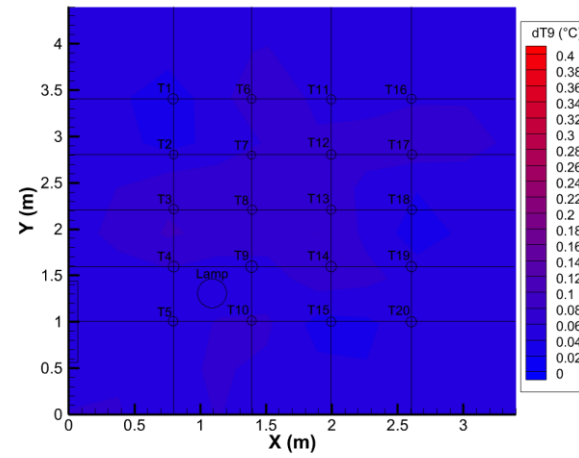
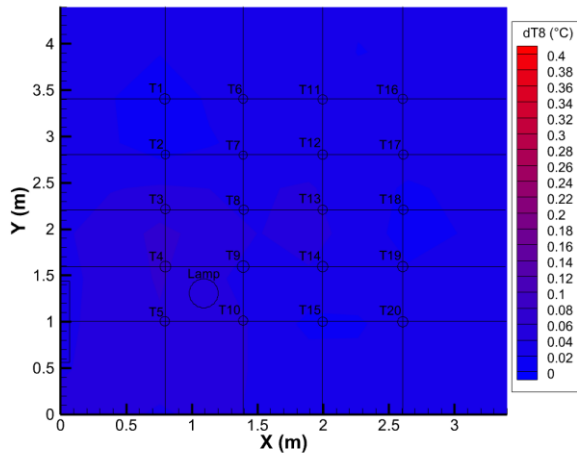
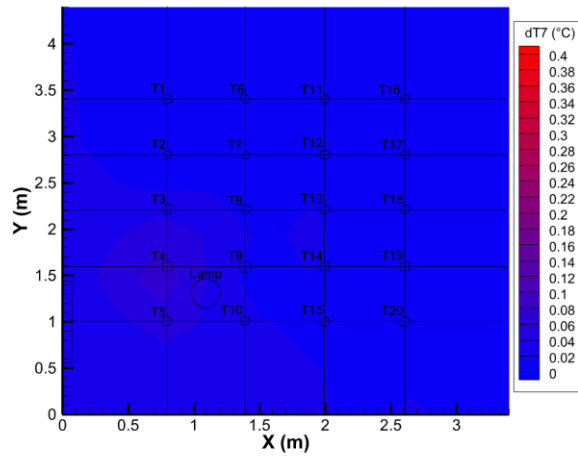
2) Prove accensione lampada per 5 minuti, zona 2



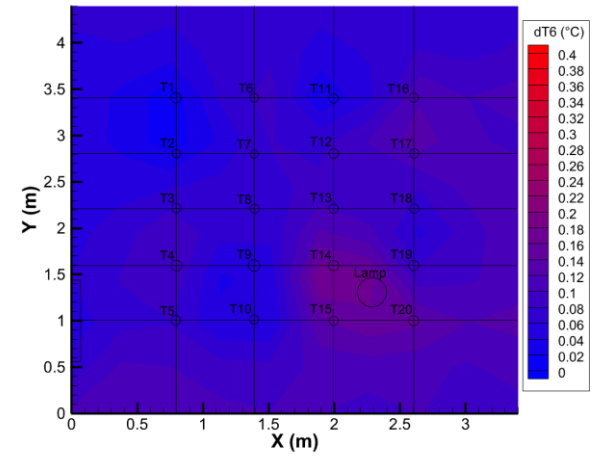
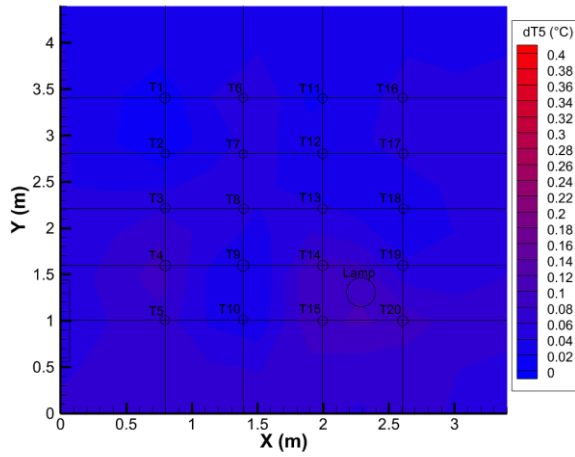
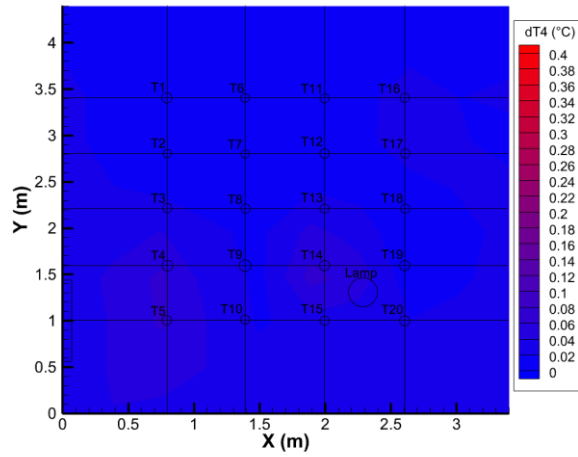
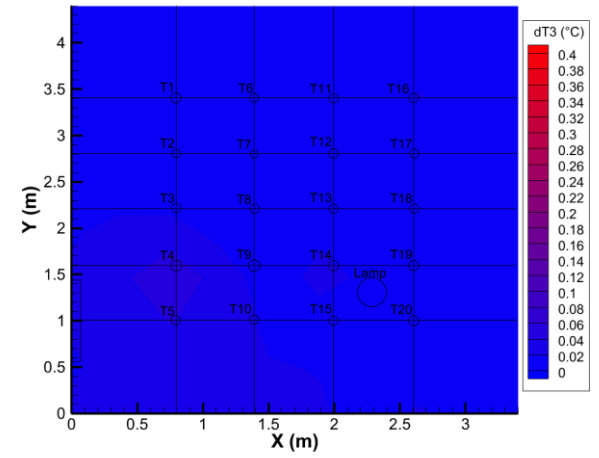
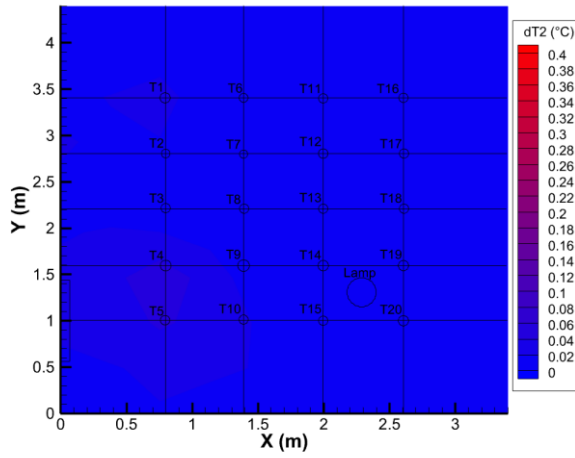
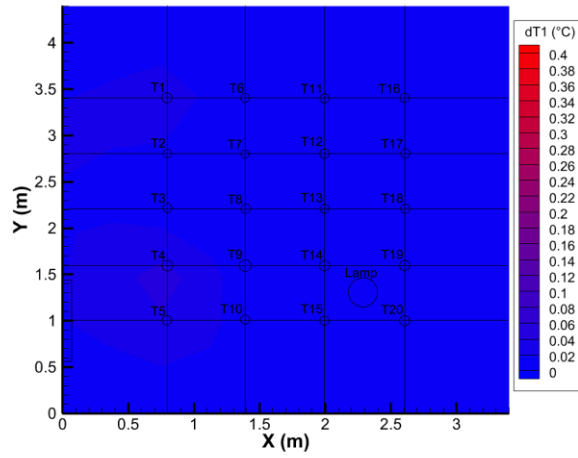


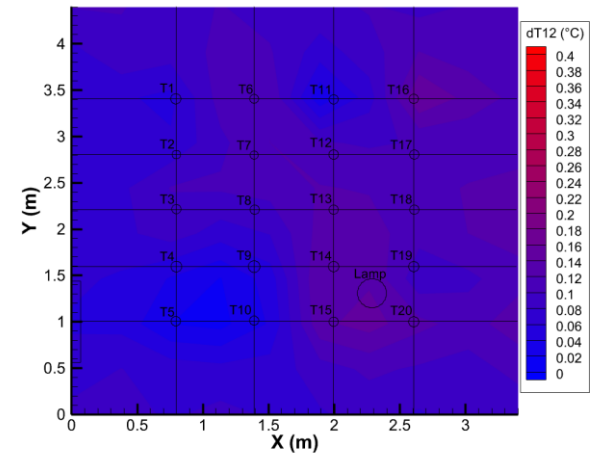
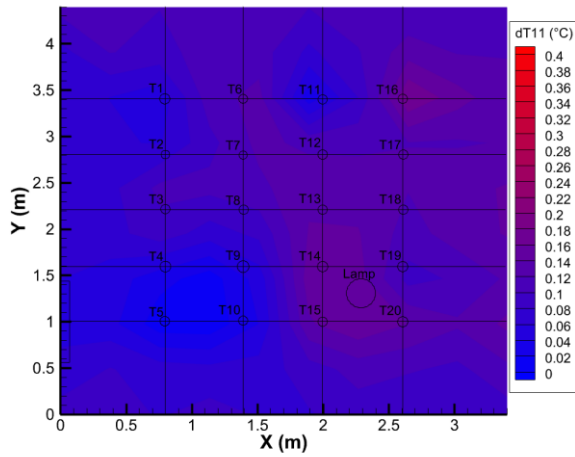
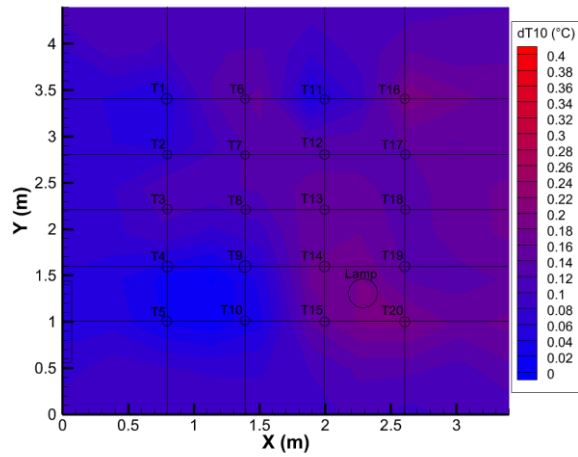
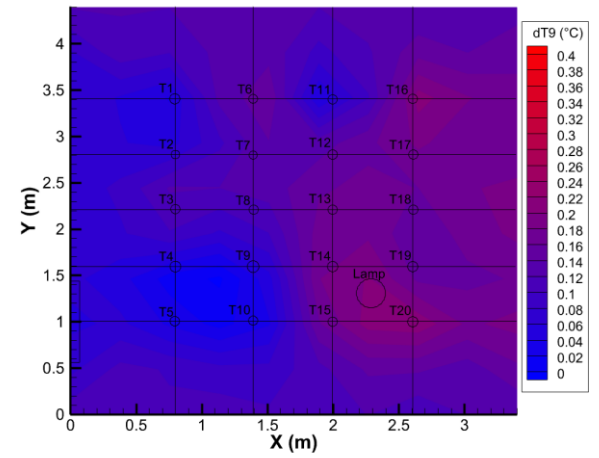
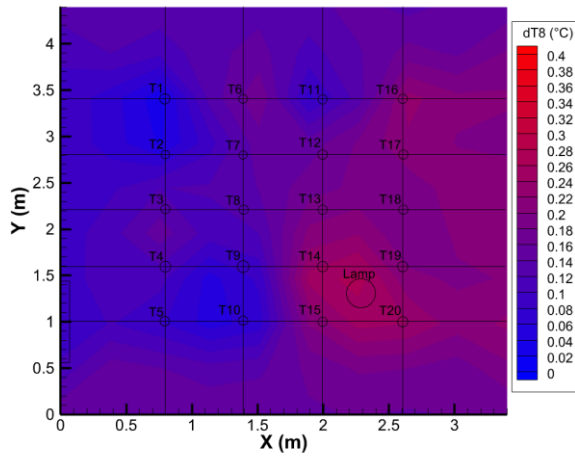
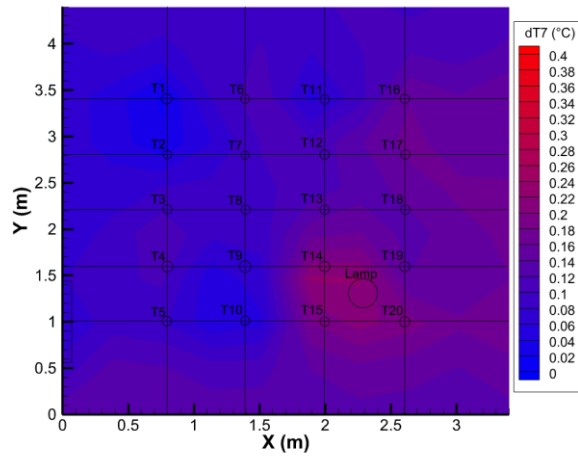
3) Prove accensione lampada per 5 minuti, zona 3





4) Prove accensione lampada per 5 minuti, zona 4





Ringraziamenti

A conclusione del mio elaborato e di questo percorso universitario iniziato a settembre 2020 presso l'UNIVPM, sono diverse le persone che mi sento in dovere di ringraziare.

Come prima cosa, tengo a ringraziare le tre persone che mi hanno accompagnato in questo ultimo periodo di università: la mia relatrice Prof.ssa Ing. Francesca Stazi per avermi proposto argomenti interessanti per il mio lavoro di tesi, il Prof. Ing. Costanzo Di Perna per avermi aiutato nello svolgimento del tirocinio e nelle relative prove eseguite in laboratorio e la Dott.ssa Serena Summa per la sua infinita pazienza dimostrata durante tutto questo periodo.

I miei ringraziamenti più preziosi vanno poi ai miei genitori, a mia madre Fabiola e a mio padre Roberto, per avermi sostenuto sia economicamente che psicologicamente e per non avermi fatto mai mancare nulla, permettendomi di finire questa avventura; a cui vanno anche delle scuse per tutto il tempo sprecato nel corso della laurea triennale.

Un ringraziamento speciale va, inoltre, alla mia ragazza Eleonora per avermi incentivato nel portare a termine il percorso intrapreso e aver sopportato le mie emozioni negative e positive, nel corso di questi ultimi 2 anni.

Un ultimo ringraziamento va ai miei nuovi amici e compagni di viaggio: a Filippo per avermi supportato e per aver condiviso molto del percorso universitario scelto, a Lorenzo per il costante aiuto morale e ai suoi appunti magistrali.