



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

---

# **Sviluppo di un sistema IoT per la misura della qualità ambientale indoor**

## **Development of an IoT system for measuring indoor environmental quality**

Candidato:  
**Lorenzo Santarelli**

Relatore:  
**Prof. Gian Marco Revel**

Correlatore:  
**Ing. Serena Serroni**

Anno Accademico 2023-2024



# Abstract

Nella progettazione degli edifici è cruciale la valutazione del comfort termico, poiché questa sensazione è influenzata sia da fattori soggettivi che ambientali, rendendone complessa una misurazione diretta. Per quantificare il comfort termico sono stati sviluppati diversi indici, tra cui l'indice PMV, che stima la percezione di comfort in ambienti chiusi sulla base di quattro parametri ambientali e due personali.

Il “Comfort Eye” è uno strumento IoT progettato dall'Università Politecnica delle Marche per valutare questi indici. Utilizzando dati raccolti da due nodi, il dispositivo è capace di scambiare e archiviare informazioni in tempo reale. Tuttavia, nel corso dell'uso, sono emerse alcune problematiche.

Per risolvere queste difficoltà è stato sviluppato un nuovo prototipo del Comfort Eye, che integra tutti i sensori necessari in un unico nodo, semplificando le operazioni di misurazione e installazione. Attraverso l'analisi dei dati del sensore attuale, sono state simulate le prestazioni del nuovo prototipo, consentendo un confronto dettagliato tra le due versioni.

É stata poi sviluppata una prova sperimentale per la validazione del nuovo sensore, risultato accurato e in linea con quanto simulato, dimostrando di essere meno invasivo e comunque efficace per l'analisi del benessere termico.

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Contesto . . . . .	1
1.1.1 Nozioni di base . . . . .	2
1.2 Panoramica della ricerca . . . . .	7
<b>2 Stato dell'arte</b>	<b>8</b>
2.1 Comfort Eye e Comfort Air . . . . .	8
2.1.1 Comfort Eye . . . . .	8
2.1.2 Comfort Air . . . . .	11
2.1.3 Problematiche del Comfort Eye . . . . .	13
<b>3 Nuovo prototipo</b>	<b>14</b>
3.1 Caratteristiche del nuovo prototipo . . . . .	14
3.1.1 Melexis MLX90640 . . . . .	15
3.1.2 Confronto MLX90640 e MLX90621 . . . . .	16
3.2 Disposizione del sensore . . . . .	17
3.3 Protocollo di acquisizione . . . . .	18
3.4 Test iniziali . . . . .	20
3.5 Acquisizione dati . . . . .	22
<b>4 Prova sperimentale</b>	<b>23</b>

## *INDICE*

4.1	Strumentazione utilizzata . . . . .	23
4.1.1	Nuovo prototipo . . . . .	23
4.1.2	Stazione microclimatica . . . . .	26
4.2	Descrizione della prova . . . . .	29
4.3	Processamento dei dati . . . . .	31
4.3.1	Conversione del file .cvs in matrici . . . . .	31
4.3.2	Correzione geometrica . . . . .	32
4.3.3	Valutazione temperature medie . . . . .	34
4.3.4	Correzione dell'emissività . . . . .	36
4.3.5	Valutazione indici di comfort . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Analisi dati</b>	<b>43</b>
5.1	Valutazione temperatura media radiante . . . . .	43
5.2	Valutazione PMV . . . . .	44
5.3	Valutazione statistiche . . . . .	46
5.4	Andamento temperatura dell'aria e umidità relativa . . .	48
<b>6</b>	<b>Idee e sviluppi futuri</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>52</b>

# Elenco delle figure

1.1	Tabella valutazione PMV . . . . .	4
1.2	Relazione PMV-PPD . . . . .	5
1.3	Mappa termica . . . . .	6
2.1	Comfort Eye . . . . .	9
2.2	Scansione Comfort Eye . . . . .	10
2.3	MLX90621 . . . . .	11
2.4	Comfort Air . . . . .	12
2.5	Ventilazione Comfort Air . . . . .	12
3.1	Confronco Comfort Eye - Nuovo prototipo . . . . .	15
3.2	Melexis MLX90640 . . . . .	16
3.3	Confronto MLX90640 - MLX90621 . . . . .	17
3.4	Raspberry Pi5 . . . . .	18
3.5	Cablaggio MLX90640 . . . . .	19
3.6	Raspberry Pi 5 pinout . . . . .	19
3.7	Acquisizioni per test iniziali . . . . .	21
3.8	Melexis MLX90614 . . . . .	21
4.1	Termocoppia tipo T . . . . .	25
4.2	Keysight 34972a . . . . .	25
4.3	Stazione microclimatica HD 32.1 . . . . .	26
4.4	Sonda HP3217 . . . . .	27
4.5	Sonda TP3275 . . . . .	27

## *ELENCO DELLE FIGURE*

4.6	Sonda AP3203 . . . . .	27
4.7	Sonda HP3201 . . . . .	28
4.8	Planimetria ambiente di misura . . . . .	29
4.9	Esempio acquisizione . . . . .	32
4.10	Valutazione parti da eliminare . . . . .	33
4.11	Valutazione parti da eliminare . . . . .	33
4.12	Matrice con spigoli eliminati . . . . .	34
4.13	Matrice scomposta . . . . .	35
4.14	Tr senza la correzione dell'emissività . . . . .	38
4.15	Tr con la correzione dell'emissività . . . . .	39
5.1	Andamento temperatura media radiante . . . . .	43
5.2	Andamento differenza delle temperature medie radianti .	44
5.3	Andamento PMV . . . . .	45
5.4	Andamento differenza del PMV . . . . .	46
5.5	Istogramma dei residui della temperatura media radiante	47
5.6	Istogramma dei residui del PMV . . . . .	47
5.7	Andamento temperatura dell'aria . . . . .	48
5.8	Andamento dell'umidità relativa . . . . .	49

# 1 Introduzione

## 1.1 Contesto

Al giorno d'oggi, le esigenze e i ritmi della società moderna rendono necessaria la comprensione dei diversi fattori che influenzano la qualità della vita delle persone, costrette a trascorrere fino all' 87% del tempo in ambienti chiusi di varia natura, senza considerare un ulteriore 6% nei diversi mezzi di trasporto. Da questi dati è evidente come i fattori che influenzano la qualità dell'ambiente interno (IEQ), es. acustica ed illuminazione, siano di fondamentale importanza sul comfort, sul benessere, sulla capacità di apprendimento e sulla salute, nonché produttività dei lavoratori.

Studi eseguiti in tempi recenti hanno dimostrato come parametri inadeguati abbiano avuto un impatto negativo sulle capacità cognitive degli studenti. Per questo motivo, scuole ed aziende devono prendersi carico di fornire ambienti con IEQ adeguato [1].

Questo risulta ancora più importante in un mondo dove le tematiche ambientali sono messe sempre più in primo piano.

Per una corretta valutazione dell'IEQ, è richiesta l'acquisizione di numerose grandezze fisiche volte alla valutazione di: qualità dell'aria interna, comfort termico, acustico e livelli sufficienti di illuminazione.

Nel 2019 è stata rilasciata la norma EN16798 [2] dove vengono fornite le numerose metodologie applicabili per la valutazione dell'IEQ. La principale problematica, legata a quanto detto finora, è l'impossibilità di



effettuare misurazioni delle grandezze ambientali con elevata risoluzione spaziale, data l'inadeguatezza degli strumenti a disposizione. Per colmare le lacune, negli anni è stato sviluppato un sistema di monitoraggio multi-sensore composto da uno scanner IR (Comfort Eye), per la misurazione delle temperature delle pareti, e da un nodo da tavolo (Comfort Air), per la valutazione della qualità dell'aria interna (IAQ).

Tuttavia, questi sensori, seppur di ottima fattura, presentano dei limiti, soprattutto il Comfort Eye. Questo, infatti, presenta una meccanica particolarmente complessa e fragile.

### **1.1.1 Nozioni di base**

Vengono di seguito riportate nozioni teoriche importanti e necessarie per una completa comprensione di quanto trattato.

#### **Comfort termico**

Il comfort termico si riferisce allo stato di benessere fisico e mentale che una persona sperimenta in relazione all'ambiente chiuso in cui si trova. Garantire che la maggior parte degli occupanti di uno spazio interno si senta a proprio agio dal punto di vista termico rappresenta un segnale di sostenibilità e contribuisce a ridurre notevolmente i rischi legati allo stress e alle malattie associate alle condizioni climatiche esterne.

In un ambiente di lavoro, questo si traduce in un miglioramento della capacità di concentrazione, che porta a un conseguente aumento della produttività.

I fattori che influenzano maggiormente il comfort sono:

Fattori ambientali:

## *Contesto*

- Temperatura ambientale: temperatura dell'aria dell'ambiente esaminato;
- Temperatura media radiante: temperatura media percepita dovuta all'emissione di calore da parte delle superfici dell'ambiente;
- Umidità relativa: definita come il rapporto tra la quantità di vapore acqueo presente nell'aria e quella massima che può contenere in una specifica temperatura per unità di volume;
- Velocità dell'aria: velocità media dell'aria che circonda il soggetto.

Fattori personali:

- Abbigliamento: è rappresentativo dell'isolamento termico del soggetto;
- Tasso metabolico: calore emesso dal corpo umano, legato alla tipologia di attività effettuata.

Per la quantificazione del comfort termico sono stati introdotti degli indici come il PMV.

### **Indice PMV**

L'indice PMV (Predicted Mean Vote), sviluppato dall' Ing. P. O. Fanger, permette di stimare il comfort termico mediamente percepito da un elevato numero di persone in un ambiente definito. È basato su attività sperimentali, eseguite dallo stesso ingegnere, negli anni '60 e '70 [3]. Furono svolte coinvolgendo gruppi di volontari, che trascorrevano del tempo in camere climatiche progettate per controllare con precisione

## Contesto

variabili ambientali come la temperatura dell'aria, la temperatura radiante, la velocità dell'aria e l'umidità relativa. Per garantire uniformità nei test, ai partecipanti veniva fornito abbigliamento standardizzato, in modo da assicurare una resistenza termica omogenea. Il tasso metabolico degli individui veniva monitorato mantenendo costante l'attività svolta e misurando il calore corporeo prodotto. I volontari erano poi invitati a valutare le loro percezioni termiche utilizzando una scala che andava da “molto freddo” a “molto caldo”. I giudizi raccolti sono stati poi convertiti in valori numerici che variano da “-3”, molto freddo, a “+3”, molto caldo.

Molto freddo	Freddo	Leggero freddo	Neutro	Leggero caldo	Caldo	Molto caldo
-3	-2	-1	0	1	2	3

Figura 1.1: Tabella valutazione PMV

Il valore nullo rappresenta la neutralità termica che indica la condizione di comfort ottimale essendo il calore prodotto dal corpo uguale a quello assorbito dall'ambiente. Grazie ai dati raccolti, Fanger sviluppò un modello matematico, il PMV, in grado di prevedere accuratamente la sensazione di comfort in un determinato ambiente chiuso. Ciò è descritto dalla seguente relazione:

$$PMV = (0.303 \cdot e^{-0.036 \cdot M} + 0.028) \cdot L$$

dove:

- M: tasso metabolico, rappresentativo dell'energia prodotta dal corpo;

## Contesto

- L: carico termico, definito come la differenza tra il calore prodotto dal corpo e quello dissipato nell'ambiente. Per la quantificazione si utilizza la formula presente nella ISO7730 [4].

L'indice PMV è strettamente legato al PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), che indica la percentuale di persone che si prevede saranno insoddisfatte a un determinato valore di PMV. Questa relazione è illustrata graficamente nella seguente figura:

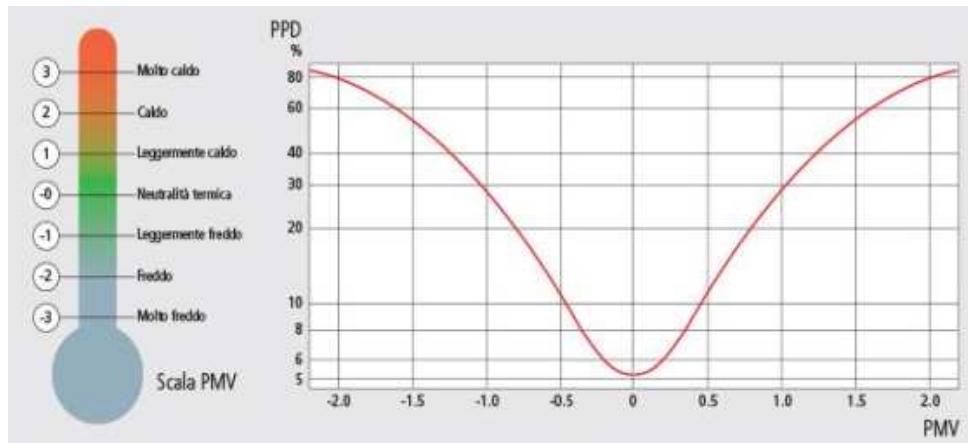


Figura 1.2: Relazione PMV-PPD

La relazione per la valutazione del PPD è descritta nella norma ISO7730 [4] ed è di seguito riportata:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)$$

Si osserva che, anche quando il PMV raggiunge il valore nullo (condizione di comfort ottimale), ci sarà comunque una piccola percentuale di occupanti insoddisfatta. Questo è dovuto al fatto che la sensazione di comfort è molto soggettiva e influenzata da fattori psicologici, fisiologici ma anche culturali.

L'importanza del PMV è confermata dalla norma ISO7730 [4], che utilizza questo indice come riferimento per valutare le prestazioni termiche degli edifici.

### **Principio di funzionamento degli scanner IR**

Tutti gli oggetti emettono energia a raggi infrarossi, la quale viene definita come “mappatura termica”. Una termocamera consente di rilevare e misurare l'energia a raggi infrarossi degli oggetti, convertendoli in un'immagine digitale che mostra la temperatura superficiale apparente dell'oggetto in fase di misurazione. Una termocamera comprende un sistema ottico che concentra l'energia a raggi infrarossi in un chip di rilevamento apposito (matrice del sensore), il quale include centinaia di pixel di rilevamento disposti su una griglia. Ogni pixel della matrice del sensore reagisce all'energia a raggi infrarossi concentrata su di lui e produce un segnale elettronico che associa ad ogni pixel un valore termico.

Di seguito un esempio di mappa termica acquisita con uno scanner termico IR:

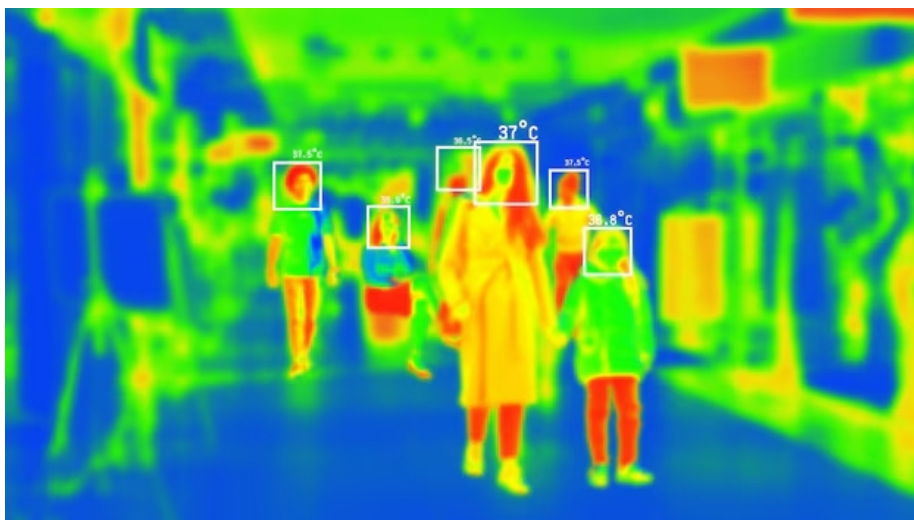


Figura 1.3: Mappa termica

## **1.2 Panoramica della ricerca**

Questa tesi si pone come obiettivo quello di superare le limitazioni del Comfort Eye tramite lo sviluppo e la descrizione di un nuovo prototipo.

La sperimentazione è stata preceduta da una fase di simulazione e analisi delle prestazioni del nuovo prototipo, sulla base dei dati acquisiti durante l'utilizzo dell'attuale sensore Comfort Eye [5].

Attraverso analisi comparative e simulazioni, sono state valutate le discrepanze nella misurazione di variabili come l'indice PMV e la temperatura media radiante. La validazione, basata su un ampio set di dati, ha confermato la precisione e la flessibilità del nuovo prototipo, che si è dimostrato un sensore meno invasivo ma altrettanto accurato nell'analisi del benessere termico.

## 2 Stato dell'arte

Questo capitolo vuole fornire un contesto di lavoro più chiaro possibile finalizzato a comprendere meglio il punto di partenza per lo sviluppo di un nuovo prototipo.

### 2.1 Comfort Eye e Comfort Air

Per il monitoraggio e la valutazione dell'IEQ sono stati sviluppati due sensori, Comfort Eye e Comfort Air, con architettura Internet of Things (IoT), al fine di consentirne il controllo, lo scambio dei dati e la comunicazione da remoto [5]. Questi sono interconnessi tra loro e con un database dove scaricano i dati acquisiti, che saranno poi utilizzati nella valutazione del comfort termico dell'ambiente preso in esame.

#### 2.1.1 Comfort Eye

Il Comfort Eye è un sensore che effettua le scansioni termiche delle pareti dell'ambiente che si vuole valutare.

È costituito da un sensore IR montato in un supporto mobile su due assi che permettono la completa scansione della stanza. Viene installato nel soffitto ed effettua una misurazione ogni 10 minuti circa. L'acquisizione dell'immagine termica è resa possibile grazie alla presenza del sensore IR MLX90621.



Figura 2.1: Comfort Eye

Per ottenere una mappatura completa delle pareti perimetrali, il dispositivo compie due rotazioni principali, seguendo un sistema di coordinate cartesiane tridimensionali, in cui le rotazioni avvengono lungo assi perpendicolari:

- Movimento Pan (asse orizzontale): il dispositivo esegue una rotazione continua di  $360^\circ$  lungo l'asse orizzontale. Questo consente di coprire e mappare tutta l'area circostante a livello orizzontale, rilevando le pareti perimetrali intorno al dispositivo;
- Movimento Tilt (asse verticale): il dispositivo si inclina da  $0^\circ$  a  $180^\circ$  lungo l'asse verticale. Questa inclinazione permette di misurare accuratamente sia il pavimento che il soffitto, completando la mappatura tridimensionale dello spazio.

La combinazione di questi due movimenti (pan e tilt) consente al “Comfort Eye” di creare una mappa tridimensionale dettagliata dell'ambiente, comprendendo pareti, pavimento e soffitto. La rotazione completa attorno a entrambi gli assi permette di ottenere un rilievo completo degli spazi senza zone cieche.



## *Comfort Eye e Comfort Air*

I dati misurati vengono acquisiti tramite protocollo I2C e poi trasmessi al database MySQL attraverso un modulo Wi-Fi integrato.

Le mappe termiche archiviate nel database vengono poi utilizzate per la valutazione del PMV.

Viene di seguito riportata un esempio della mappa termica acquisita dal Comfort Eye.

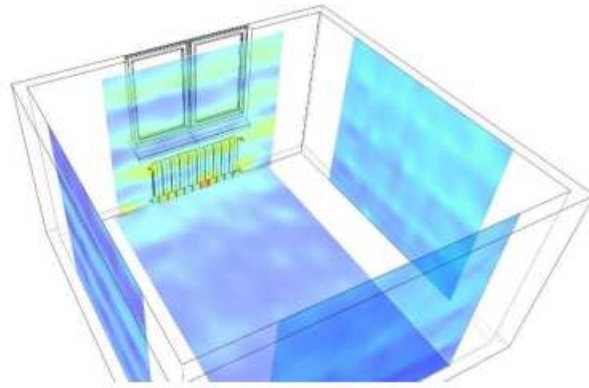


Figura 2.2: Scansione Comfort Eye

### **Melexis 90621**

Il Melexis 90621 (MLX90621) è una termopila 16x4, ciò significa che ogni fotogramma acquisito è una mappa di 64 temperature. Il campo di vista di questo sensore (FOV) è di 60°x16°, il che, come indicato dall'equazione di seguito, significa che ogni fotogramma scansiona un'area pari a 1,15x0,56 m ad una distanza di un metro dalla parete.

$$\mathcal{A}^h(u_h) = d \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( \mu_h + \frac{\phi_h}{2} \right) - \operatorname{tg} \left( \mu_h - \frac{\phi_h}{2} \right) \right]$$

$$\mathcal{A}^v(u_v) = d \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( \mu_v + \frac{\phi_v}{2} \right) - \operatorname{tg} \left( \mu_v - \frac{\phi_v}{2} \right) \right]$$

Dove si indica con:

## *Comfort Eye e Comfort Air*

- $d$ : la distanza del sensore dalla parete da scansionare;
- $\mu_h$  e  $\mu_v$ : l'inclinazione del sensore rispetto alla parete da scansionare;
- $\phi_h$  e  $\phi_v$ : il FOV del sensore.



Figura 2.3: MLX90621

### **2.1.2 Comfort Air**

Il Comfort Air è un nodo da scrivania che contiene sensori di varia natura volti a misurare:

- Temperatura dell'aria;
- Umidità relativa;
- $CO_2$ ;
- PM.

É dotato di due ingressi e un'uscita per l'aria, che non devono essere ostruiti per garantire il corretto funzionamento.

## Comfort Eye e Comfort Air

La presenza di una piccola ventola integrata permette il corretto flusso d'aria interno al sensore.

LED colorati al di sopra del case indicano lo stato di connessione ma anche informazioni sulla quantità di  $CO_2$  nell'ambiente.

I dati, acquisiti tramite il protocollo di comunicazione I2C, vengono archiviati nel database MySQL sfruttando un modulo Wi-Fi integrato.

Per garantire l'integrità e l'affidabilità dei dati rilevati da un sensore in un ambiente chiuso, è fondamentale scegliere una posizione strategica all'interno della stanza. Il sensore deve essere collocato in modo da minimizzare l'interferenza di fonti di calore, come radiatori o apparecchi elettronici, e deve essere evitata l'esposizione diretta alla radiazione solare, che potrebbe alterare i valori termici.

Inoltre, è altrettanto importante evitare le zone dove l'aria tende a non circola adeguatamente, come angoli o spazi vicino a mobili ingombranti. Un corretto posizionamento permette una misurazione accurata e rappresentativa delle condizioni termiche generali della stanza.



Figura 2.4: Comfort Air

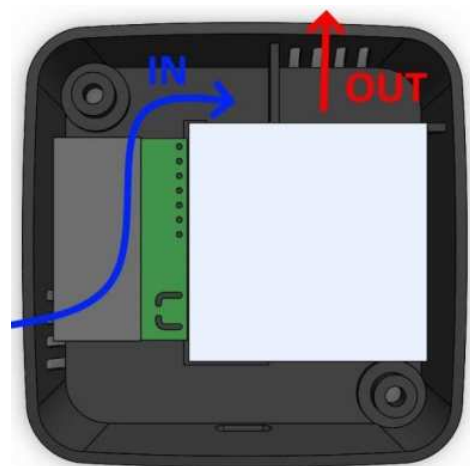


Figura 2.5: Ventilazione Comfort Air

### **2.1.3 Problematiche del Comfort Eye**

Nonostante l'efficacia del Comfort Eye, il sistema presenta alcune criticità che ne possono limitare l'uso.

Una delle principali problematiche è la necessità di un'alimentazione continua a 12V per il nodo installato a soffitto. Questo requisito implica l'intervento di un tecnico specializzato per l'installazione e il collegamento alla rete elettrica, con un aumento dei costi e della complessità.

Un'altra criticità è legata al movimento continuo del dispositivo, che generando rumore, seppur lieve, potrebbe risultare fastidioso agli occupanti della stanza. Il meccanismo di rotazione del sensore, inoltre, potrebbe essere soggetto a impuntamenti meccanici.

Questi problemi, anche se rari, possono compromettere l'accuratezza dei dati raccolti, generando mappe termografiche errate.

Come ultima problematica l'installazione del Comfort Eye richiede, talvolta, modifiche strutturali al soffitto, che possono risultare invasive, soprattutto in edifici di valore architettonico, limitando così l'applicabilità del dispositivo in contesti in cui la preservazione estetica e strutturale non è prioritaria.

## 3 Nuovo prototipo

Come già espresso nella parte introduttiva di questa tesi, le problematiche relative al corretto funzionamento del Comfort Eye non sono trascurabili, per motivazioni quali:

- Necessità di alimentazione 12 V;
- I movimenti del sensore potrebbero causare noie acustiche;
- Affidabilità non totale, soprattutto per quanto riguarda il movimento della testina;
- Installazione invasiva in particolari condizioni.

Con lo scopo di migliorare quanto descritto e già realizzato, è stato sviluppato un nuovo prototipo, come di seguito descritto.

### 3.1 Caratteristiche del nuovo prototipo

L'idea alla base dello sviluppo del nuovo prototipo è quella di riuscire ad integrare in un unico nodo plug&play tutti i sensori utili alla valutazione dell'IEQ. In altre parole significa fondere insieme Comfort Eye e Comfort Air, attuando una modifica sull'acquisizione delle mappe termiche delle pareti.

Per avere una misura più accurata della temperatura media radiante verrà usato un array IR MLX90640 32x24, molto più performante del MLX90621 usato nel Comfort Eye, rivolto verso la parete più esposta.

## Caratteristiche del nuovo prototipo

Per valutare le temperature medie delle altre pareti si era inizialmente pensato di utilizzare sensori puntuali MLX90614, ma che, per motivi di seguito spiegati, non sono stati impiegati.

Nel nuovo prototipo, i parametri per la valutazione dell'IAQ, saranno misurati con gli stessi sensori presenti nel Comfort Air [5]. Nella figura di seguito è riassunto quanto detto finora, in particolare alla sinistra si osserva la vecchia modalità di misura e a destra la nuova.

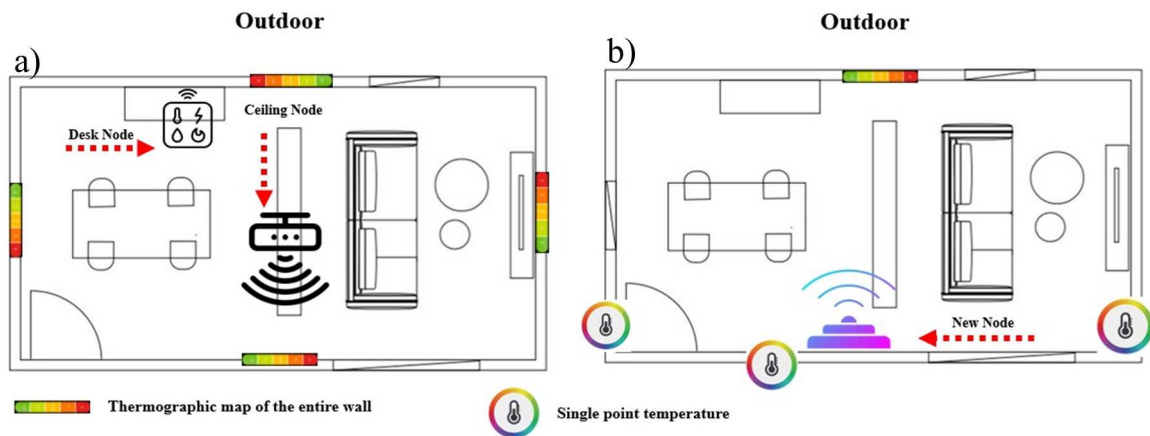


Figura 3.1: Confronto Comfort Eye - Nuovo prototipo

### 3.1.1 Melexis MLX90640

Il Melexis MLX90640 è il sensore selezionato, dopo una vasta ed accurata ricerca, per effettuare la scansione termica delle pareti e valutare la temperatura media radiante, un parametro fondamentale per l'IEQ. Si tratta di un array IR 32x24; ciò significa che, ogni fotogramma, è costituito da 768 pixel ad ognuno dei quali è associato un valore di temperatura.



Figura 3.2: Melexis MLX90640

Il sensore è disponibile con due differenti FOV:

- $55^{\circ} \times 35^{\circ}$ , che equivale ad un'area  $1,04 \times 0,63\text{m}$  ad un metro di distanza dalla parete. Il codice associato è BAB;
- $110^{\circ} \times 75^{\circ}$ , che equivale ad un'area  $2,86 \times 1,5\text{m}$  ad un metro di distanza dalla parete. Il codice associato è BAA.

La frequenza aggiornamento  $0,5\text{-}64\text{Hz}$  programmabile, con sensibilità di  $0,1\text{ K}$  e tensione di alimentazione  $3,3\text{ V}$ .

### **3.1.2 Confronto MLX90640 e MLX90621**

Viene di seguito riportata una tabella che permette di confrontare in maniera più dettagliata i due sensori presi in esame.

## Disposizione del sensore

Famiglie	Melexis		
Modelli	MLX90621	MLX90640	
Sottomodelli	/	BAA	BAB
Tipologia	16x4	32x24	
Pixel	64	768	
Fov	60°x16°	110°x75°	55°x35°
Area associata	1,15x 0,28 m	2,86x1,5m	1,04x0,63m
Frequenza refresh	0,5Hz-512Hz programmabile	0,5-64Hz programmabile	
Tensione di alimentazione	2,6 V	3,3V	
Consumo di corrente	9mA	23mA	
Sensibilità termica	/	0,1K	
Range misurabile	-40°C... 85°C	-40°C ÷ 85°C	
Prezzo	€50-60	€30-35	
Reperibilità	Alta	Alta	

Figura 3.3: Confronto MLX90640 - MLX90621

Si nota come l'MLX90640 abbia caratteristiche migliori rispetto all'MLX90621.

Questo ha fatto sì che la scelta del sensore ricadesse sul primo citato, in particolare la versione con FOV maggiore (110°x75°).

### 3.2 Disposizione del sensore

Il sensore viene disposto in posizione centrale nella parete di fronte a quella più esposta, scansionando in direzione di quest'ultima.

Per la valutazione dell'area inquadrata dal sensore, è stato sviluppato un programma Python che ha come grandezze di input solamente le dimensioni caratteristiche della stanza: altezza, larghezza e profondità. Dato l'elevato FOV del MLX90640, lo script ci permette di valutare anche le temperature superficiali delle pareti laterali, del soffitto e del pavimento, e di sapere il numero di pixel che cadono sulla parete frontale per data geometria.



### **3.3 Protocollo di acquisizione**

L'acquisizione dati del sensore è eseguita usando la Raspberry Pi 5, una scheda elettronica multiuso basata sul kernel Linux.



Figura 3.4: Raspberry Pi5

La prima fase di questo processo è stata quella di scaricare nella Raspberry il sistema operativo e tutti i moduli necessari per l'acquisizione dei dati dal sensore.

#### **Protocollo di comunicazione**

Il protocollo di comunicazione utilizzato è l' I2C, (Inter-Integrated Circuit). È ampiamente utilizzato in sistemi embedded per la connessione di microcontrollori, sensori e altri dispositivi.

Caratteristica principale del protocollo I2C è l'architettura a 2 fili:

- SDA (Serial Data Line): per il trasferimento dei dati;
- SCL (Serial Clock Line): per il segnale di clock che sincronizza il trasferimento dei dati.

Il protocollo I2C funziona con un dispositivo master e uno o più dispositivi slave. Il master controlla la comunicazione, genera il segnale

## Protocollo di acquisizione

di clock e avvia le trasmissioni. Gli slave rispondono alle richieste del master.

### Connessione del sensore alla Raspberry

La connessione fisica del sensore con la Raspberry è stata realizzata sfruttando un cablaggio apposito con connettore dedicato.

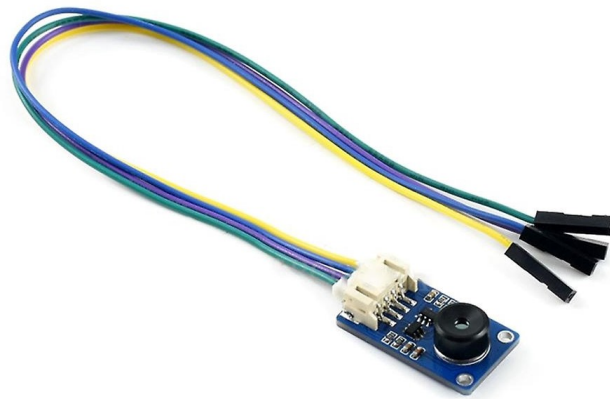


Figura 3.5: Cablaggio MLX90640

L'altra estremità del cablaggio va connessa alla Raspberry nel modo riportato di seguito.

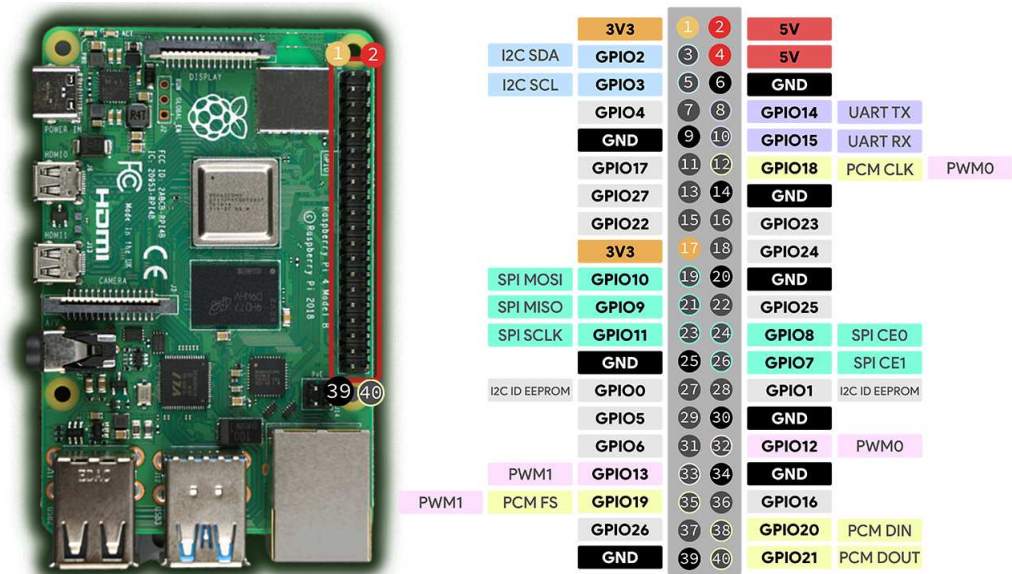


Figura 3.6: Raspberry Pi 5 pinout

## *Test iniziali*

Dove:

- Il cavo verde rappresenta SCL;
- Il cavo giallo rappresenta VCC 3,3V;
- Il cavo viola rappresenta SDA;
- Il cavo blu rappresenta GND.

Da connettere come mostrato in immagine.

### **3.4 Test iniziali**

La fase preliminare di test è stata svolta per verificare il corretto funzionamento del sensore.

Inizialmente è stato sviluppato un programma in Python che permette di visualizzare in tempo reale quanto scansionato dal sensore per svolgere le prime verifiche.

Avviato quindi lo scambio dati tramite il programma sopra citato, sono stati verificati: il corretto funzionamento del sensore, il FOV e la precisione, il tutto posizionando in modo opportuno punti caldi e freddi nella zona scansionata.

## Test iniziali

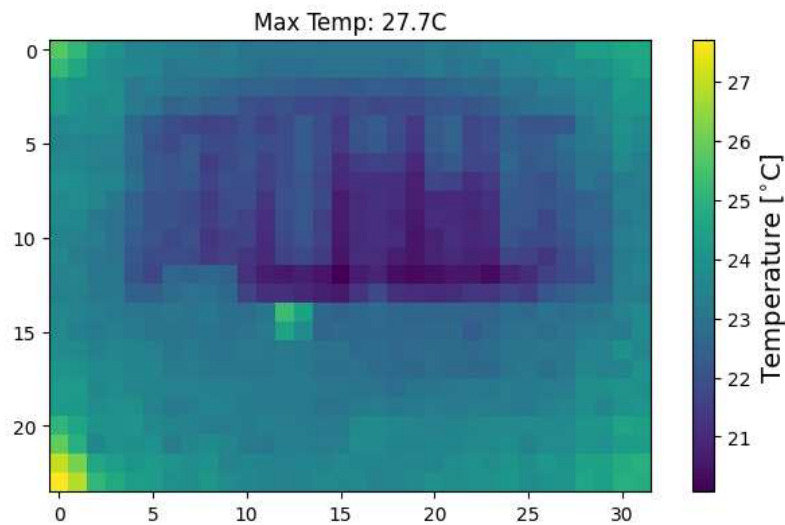


Figura 3.7: Acquisizioni per test iniziali

In relazione alle caratteristiche del sensore scelto, si osserva come la mappa termica acquisita è un array 24x32.

Dalla fase di test si è notato che, dato l'elevato FOV del sensore sia in direzione verticale che orizzontale, per le dimensioni standard degli ambienti, il prototipo è in grado di valutare, oltre alle temperature della parete frontale, anche quelle del pavimento, soffitto, parete laterale destra e sinistra. Questo ci ha consentito di fare valutazioni anche sulla temperatura media delle altre pareti senza utilizzare i sensori MLX90614 su tutte le pareti esclusa la frontale, come da idea iniziale, ma solamente in quella dove è installato il nuovo prototipo.



Figura 3.8: Melexis MLX90614

### **3.5 Acquisizione dati**

Verificato il corretto funzionamento del prototipo è stato sviluppato un nuovo script Python in grado di acquisire i dati dal sensore con cadenza temporale a scelta, variando opportunamente un parametro di setting. Questo programma genera un file .csv, risultato del processo di acquisizione, che contiene tutti gli array termici salvati con cadenza precedentemente impostata.

Il file .csv generato viene poi estratto dalla Raspberry tramite una semplice chiavetta Usb e importato in un computer che si occuperà dei suoi futuri processamenti.

## 4 Prova sperimentale

Terminata la fase relativa allo sviluppo e all'acquisizione dati del sensore, si rende necessaria una prova sperimentale per verificare e validare le migliori ipotizzate tramite un confronto diretto con il riferimento, rappresentato dalla stazione microclimatica HD32.1.

### 4.1 Strumentazione utilizzata

La strumentazione utilizzata per lo svolgimento della prova sperimentale si può racchiudere in 2 macroclassi, in grado di fare valutazioni indipendenti del PMV.

Queste classi sono:

- Nuovo prototipo;
- Stazione microclimatica HD 32.1.

#### 4.1.1 Nuovo prototipo

Per effettuare la misurazione con il nuovo prototipo si è resa necessaria la seguente strumentazione:

- Melexis MLX 90640;
- Raspberry Pi 5;
- Periferiche di input e output;
- Supporti appositi;

## *Strumentazione utilizzata*

- Termocoppie;
- Scheda di acquisizione dati Keysight 34972a;
- Pennetta Usb.

### **Melexis MLX 90640**

Melexis MLX90640 è stato utilizzato per la valutazione delle temperature superficiale delle pareti e come elemento teoricamente migliorativo del Comfort Eye.

### **Raspberry Pi 5**

Scheda elettronica multifunzione basata su Linux e molto utilizzata in ambito di prototipazione e testing elettronico. Nel nostro caso gestisce l'acquisizione del nuovo prototipo.

### **Periferiche di input e di output**

Per comunicare con il nuovo prototipo, gestito dalla Raspberry, si sono rese necessarie delle periferiche da connettere alla scheda elettronica per visualizzare quanto scansionato dal sensore e per gestirne l'acquisizione.

### **Supporti appositi**

Utilizzati per sostenere la strumentazione sopra citata.

### **Tre termocoppie**

Termocoppie di tipo T (rame-costantana) di cui due utilizzate per la valutazione della temperatura dell'unica parete non scansionata dal sensore. Sono connesse alla parete da misurare tramite del nastro adesivo che mantiene in perenne contatto l'estremità di misura. Ne vengono utilizzate due per avere una lettura più accurata, facendo la media su

## *Strumentazione utilizzata*

due punti differenti, ma anche per consentire il proseguo del test nell'eventuale rottura di una delle due. Una terza termocoppia è installata sulla parete laterale destra e viene utilizzata per valutare l'effetto della geometria della parete laterale sul nuovo prototipo.



Figura 4.1: Termocoppia tipo T

### **Scheda di acquisizione dati Keysight 34972a**

La scheda di acquisizione Keysight 34972a consente la lettura dei dati dalle termocoppie e il loro salvataggio. È importante settare la scheda in maniera opportuna in termini di: grandezza da acquisire, tipologia termocoppia connessa, numero e frequenza delle acquisizioni.



Figura 4.2: Keysight 34972a



## **Pennetta Usb**

Inserita nella Keysight 34972a, viene utilizzata come memoria per il salvataggio dei dati termici misurati dalle termocoppie.

### **4.1.2 Stazione microclimatica**

La stazione microclimatica HD32.1 è stata utilizzata come parametro di confronto rispetto a quanto misurato dal nuovo prototipo.

É costituita da una centralina, che funge da cervello della macchina, e da un insieme di sonde, ad essa connesse, che effettuano misure relative a velocità dell'aria, temperatura e umidità.



Figura 4.3: Stazione microclimatica HD 32.1

In particolare le sonde utilizzate sono:

- HP3217, sonda combinata temperatura umidità relativa con sensore Pt100 a film sottile per la misura della temperatura e sensore capacitivo per l'umidità.

## *Strumentazione utilizzata*



Figura 4.4: Sonda HP3217

- TP3275, sonda globotermometro ( $\Phi = 150$  mm) secondo norme ISO 7243- ISO 7726, utilizzato per la valutazione della radiazione termica.



Figura 4.5: Sonda TP3275

- AP3203, sonda a filo caldo omnidirezionale per la valutazione della velocità dell'aria. Il sensore è un NTC 10kOhm con gabbia metallica di protezione.



Figura 4.6: Sonda AP3203

## *Strumentazione utilizzata*

- HP3201, sonda a bulbo umido a ventilazione naturale per la misura dell'indice WBGT. Prima dell'utilizzo va riempito il serbatoio per tre quarti con acqua distillata, necessaria anche per impregnare l'apposita calza da inserire nell'alloggiamento predisposto.



Figura 4.7: Sonda HP3201

Tutti i sensori utilizzati, come la centralina, devono essere installati sull'apposito cavalletto e poi cablati con la centralina stessa.

Completata l'operazione preliminare di montaggio, e connesso l'apparato alla rete elettrica, si può programmare la centralina scegliendo i parametri di acquisizione: dove far avvenire il salvataggio dei dati e la frequenza dell'operazione.

Quando descritto finora va posizionato al centro della stanza per ottenere una misura che sia più precisa ed accurata possibile.

Va chiarito che per svolgere la misurazione in modo opportuno, sono state installate tutte le sonde a disposizione, eccedendo così nella quantità di dati a disposizione, rispetto a quelli realmente utilizzati. Le sonde che hanno fornito i dati necessari per le considerazioni successive sono:

- HP3217 per la valutazione della temperatura dell'aria “ $T_a$ ” e l'umidità relativa “ $R_h$ ”;

## Descrizione della prova

- TP3275 per la valutazione della temperatura media radiante "Tr".

Anche l'anemometro a filo caldo (AP3203) sarebbe potuto risultare utile, ma, essendo l'ambiente di misura scarsamente ventilato, restituiva un valore della velocità dell'aria nulla per la maggior parte delle acquisizioni.

### 4.2 Descrizione della prova

La prova è stata eseguita su una stanza della seguente geometria:

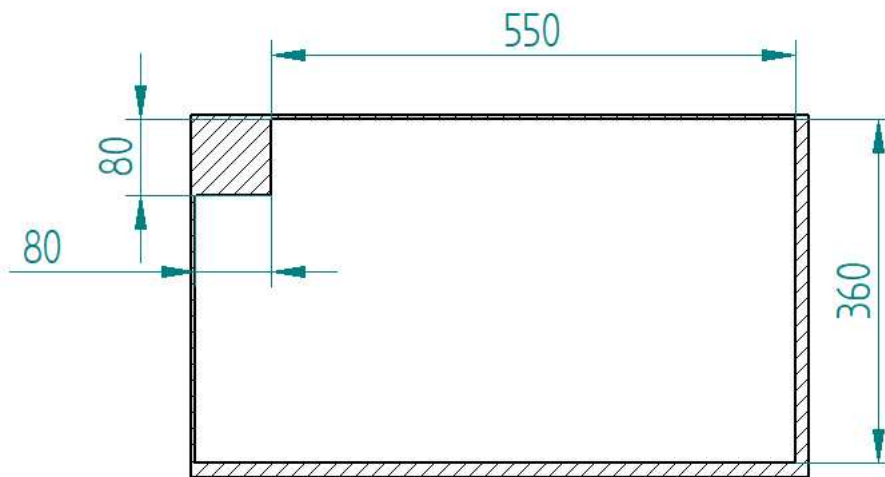


Figura 4.8: Planimetria ambiente di misura

Le due pareti più sottili sono vetrate.

Come prima operazione si è installato il sensore in posizione centrale con cavi uscenti verso il basso. L'ancoraggio nella parete è stato realizzato con del nastro adesivo, risultato sufficiente data l'estrema leggerezza del prototipo.

Successivamente è stata adagiata su una struttura di sostegno, la Raspberry, per poi essere collegata alle periferiche di input (tastiera e

## *Descrizione della prova*

mause) e alla periferica di output (monitor) e al sensore. Completata la precedente operazione sono stati settati tutti i parametri di acquisizione, facendo eseguire una scansione ogni 15 minuti.

Si è resa inoltre necessaria l'installazione di due termocoppie per la valutazione della temperatura superficiale della parete che non osservava il sensore e di una terza per la misurazione sulla parete laterale destra. Si è scelto di utilizzarne una coppia nella parete retrostante il sensore per avere una ridondanza e limitare dunque problematiche durante la misura.

Le termocoppie di tipo T (rame-costantana), una volta attaccate con nastro adesivo sulla parete sopra citata, sono state connesse ad una scheda di acquisizione Keysight 34972a, utilizzata per la lettura e il salvataggio dei dati su una penna Usb con cadenza impostata di 15 minuti.

Di seguito si è installata la stazione microclimatica Delta Ohm HD32.1, per avere un parametro di confronto molto valido, utilizzata per valutazioni ambientali secondo normative vigenti. È stata poi settata la frequenza di acquisizione della stazione su intervalli di 15 minuti.

La prima fase della prova termina con l'avvio dell'acquisizione dati del nuovo prototipo tramite la Raspberry, delle termocoppie e della stazione microclimatica. Si avvia così un periodo di misurazione della seguente durata:

- Inizio: 2024-09-23 13:00:00
- Fine: 2024-09-30 12:00:00

per un totale di 669 acquisizioni. Durante questo lasso di tempo sono stati eseguiti, con una certa frequenza, controlli sugli strumenti e sullo stato di avanzamento.

Trascorso il tempo sopra indicato, è stata arrestata la misurazione del nuovo prototipo, termocoppia e stazione microclimatica. I dati, tramite memorie Usb, sono stati importati in un computer per eseguire tutte le analisi.

### **4.3 Processamento dei dati**

Eseguita l'acquisizione completa, tutti i dati vanno processati per ottenere i parametri di valutazione del comfort termico.

Questo lo si realizza tramite una serie di programmi di seguito riportati, in ordine di utilizzo.

#### **4.3.1 Conversione del file .csv in matrici**

Questo programma modifica il file .csv, generato dal processo di acquisizione e salvato nella Raspberry, generando nuovi file .csv, tanti quante sono le acquisizioni eseguite, che contengono ciascuno una matrice di temperature.

È stato sviluppato per favorire i processi successivi ma anche per poter suddividere le varie misurazioni e quindi analizzare in maniera molto più dettagliata ciascuna di esse.

Opportune interfacce grafiche consentono di selezionare manualmente il file .csv di input e decidere dove salvare i file di output generati dal programma.

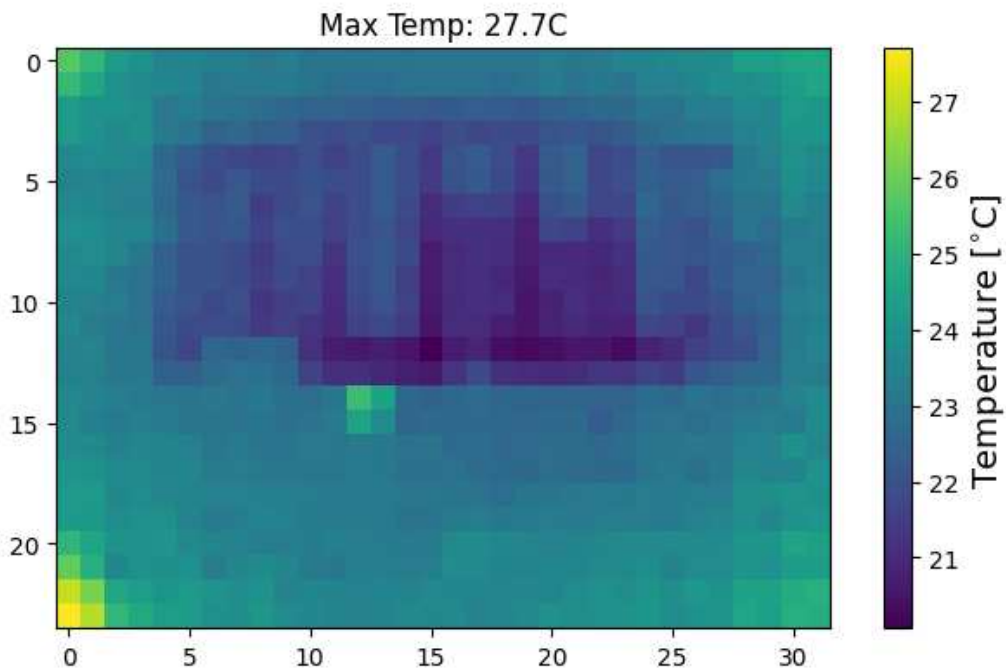


Figura 4.9: Esempio acquisizione

### 4.3.2 Correzione geometrica

Questo programma modifica le matrici precedentemente generate e salvate, in modo da eliminarne gli spigoli, o meglio, sostituendoli con valori nulli.

Il programma riceve in ingresso le dimensioni della stanza e, tramite una serie di calcoli, è in grado di restituire il numero di pixel necessario per ricoprire la parete frontale, il soffitto, il pavimento, le pareti laterali e gli spigoli, restituendo, inoltre, altri parametri. Questo viene fatto in maniera del tutto automatica nel modo seguente:

## Processamento dei dati

```
# Calcolo dei parametri
d = 3.60 # distanza tra il sensore e la parete di fronte, espressa in metri
u_h = 0 # inclinazione del sensore con la parete di fronte nella direzione orizzontale
u_v = 0 # inclinazione del sensore con la parete di fronte nella direzione verticale
fov_h = 110 # fov in direzione orizzontale espresso in gradi
fov_v = 75 # fov in direzione verticale espresso in gradi

# Altezza totale e larghezza totale scansionata
A_h = d * (math.tan(math.radians(u_h + fov_h / 2)) - math.tan(math.radians(u_h - fov_h / 2)))
A_v = d * (math.tan(math.radians(u_v + fov_v / 2)) - math.tan(math.radians(u_v - fov_v / 2)))
print(f"Larghezza scansionata: {A_h}")
print(f"Altezza scansionata: {A_v}")

# Altezza e larghezza di un singolo pixel nella parete
A_h_min = A_h / 32
A_v_min = A_v / 24
print(f"Larghezza pixel: {A_h_min}")
print(f"Altezza pixel: {A_v_min}")

# Dimensioni della parete
Larghezza_parete = 5.50 # larghezza parete di fronte al sensore
Altezza_parete = 2.90 # altezza parete di fronte al sensore
```

Figura 4.10: Valutazione parti da eliminare

```
# Dimensioni della parete
Larghezza_parete = 5.50 # larghezza parete di fronte al sensore
Altezza_parete = 2.90 # altezza parete di fronte al sensore

# Calcolo del numero di righe e colonne necessari per coprire la parete
Righe_parete = int(round(Altezza_parete / A_v_min, 0))
Colonne_parete = int(round(Larghezza_parete / A_h_min, 0))
print(f"Numero righe per coprire parete: {Righe_parete}")
print(f"Numero colonne per coprire parete: {Colonne_parete}")

# Funzione per arrotondare al numero pari inferiore
def arrotonda_a_pari_inferiore(num):
    if num % 2 != 0:
        return num - 1
    return num

# Calcolo delle righe e colonne da eliminare
righe_da_eliminare = arrotonda_a_pari_inferiore(24 - Righe_parete)
colonne_da_eliminare = arrotonda_a_pari_inferiore(32 - Colonne_parete)
print(f"Righe da eliminare: {righe_da_eliminare}")
print(f"Colonne da eliminare: {colonne_da_eliminare}")
```

Figura 4.11: Valutazione parti da eliminare

Ricordiamo tutto ciò è possibile grazie all'utilizzo del MLX90640 scelto che, avendo un FOV molto importante, è in grado di scansionare oltre alla parete frontale, anche le altre quattro ad essa circostanti.

Una volta associata ad ogni pixel la sua disposizione fisica nella stanza, una semplice funzione individua gli elementi degli spigoli e li sostituisce.



tuisce. Questa modifica viene fatta perchè i quattro angoli hanno geometria complessa e soprattutto inclinazioni differenti rispetto al sensore, influenzando negativamente la misura rendendola, di conseguenza, poco accurata.

Il programma sfrutta opportune interfacce grafiche per la selezione delle matrici di input e della cartella in cui salvare le matrici generate con gli spigoli modificati. Una volta eseguito questo programma, in uscita otteniamo matrici con la seguente geometria:

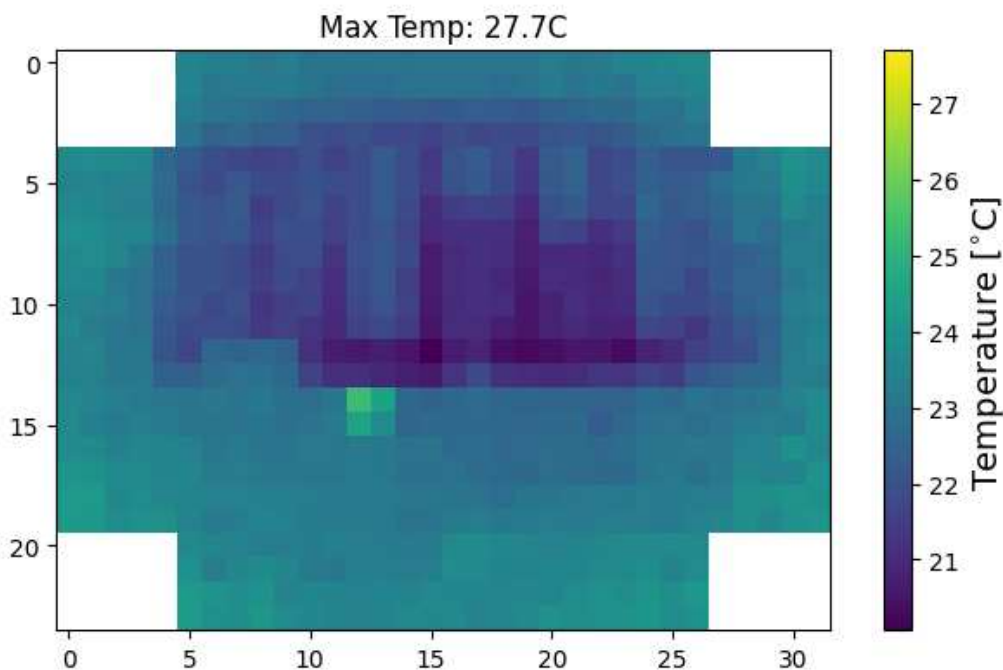


Figura 4.12: Matrice con spigoli eliminati

### 4.3.3 Valutazione temperature medie

Questo programma riceve in ingresso le matrici con gli spigoli precedentemente modificati ed è in grado di restituire il numero di pixel necessario per ricoprire la parete frontale e quello per il soffitto, il pavimento, le pareti laterali. Il programma si basa su questa valutazione per tagliare le matrici caricate lasciando solo i valori associati alla pa-

rete frontale. Un'interfaccia grafica consente di scegliere dove salvare le nuove generate.

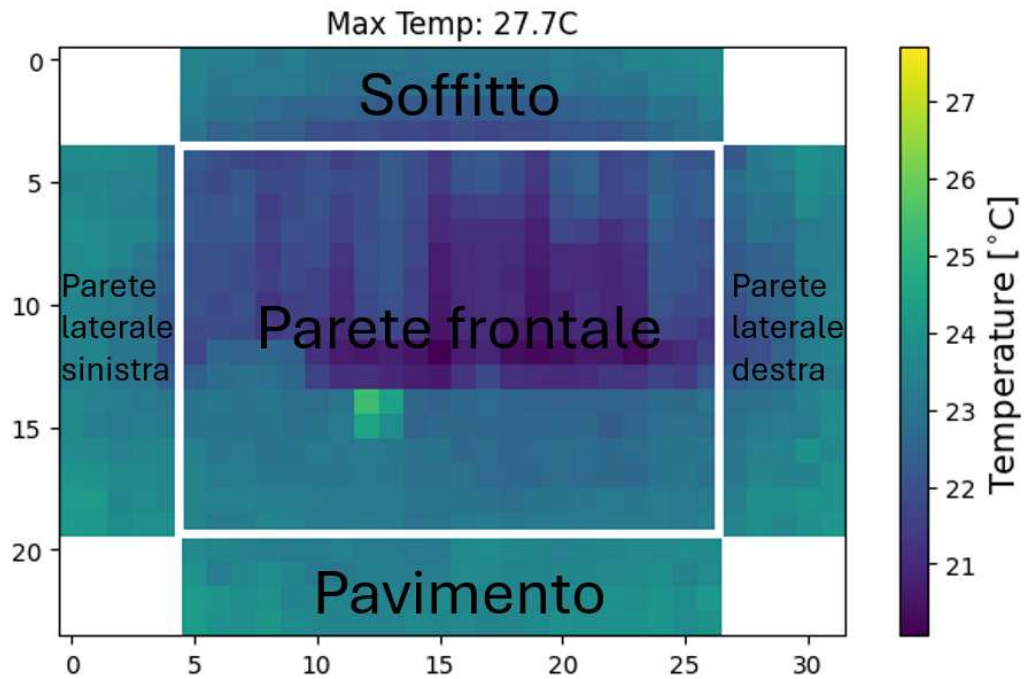


Figura 4.13: Matrice scomposta

Siamo così riusciti ad estrapolare dall'acquisizione originale solamente quei pixel legati alla parete frontale, basandoci esclusivamente sulla geometria della stanza come mostrato in figura.

Il programma valuta, inoltre, la media delle temperature delle pareti laterali, escludendo però i valori nulli e dunque gli spigoli.

I valori generati vengono poi salvati in quattro vettori, ciascuno per ogni lato, e contenuti in un file di testo.

La scelta sulla posizione di salvataggio del file di testo contenente le temperature medie viene fatta tramite un'interfaccia grafica generata automaticamente dal software.

#### 4.3.4 Correzione dell'emissività

Le temperature superficiali che abbiamo misurato vanno corrette, al fine di ottenere dati più veritieri possibili.

La correzione da apportare è quella sull'emissività, di notevole importanza per ridurre al massimo l'incertezza della misura.

È importante farla perchè non tutti i materiali emettono la stessa quantità di radiazione infrarossa anche se a parità di temperatura, perchè questo dipende dalla capacità intrinseca dell'elemento.

Questa viene corretta mediante la seguente relazione.

$$T_{\text{wallc}} = \left( \epsilon \cdot \tau \cdot \left( T_m^4 - \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon} T_{mc}^4 - \frac{(1 - \tau)}{\epsilon} T_a^4 \right) \right)^{0.25} \quad (4.1)$$

Dove:

- $\epsilon$  rappresenta l'emissività media della superficie considerata, pari a 0,85 per le finestre e 0,95 per le mura;
- $\tau$  è il coefficiente di trasmissione dell'atmosfera (assunto come valore costante pari a 0,99);
- $T_m$  è la temperatura media della parete frontale misurata dal sensore IR;
- $T_{mc}$  è la temperatura riflessa che viene calcolata misurando il contributo della superficie opposta con  $\epsilon$  unitario;
- $T_a$  è la temperatura dell'aria.

Possiamo osservare quindi che la correzione dell'emissività viene fatta considerando l'effetto della parete sulla radiazione termica, l'influenza della radiazione termica riflessa dalla parete opposta e l'influenza dell'aria atmosferica e della sua temperatura.

Va però sottolineata un'importante precisazione in merito alla valutazione della temperatura delle pareti circostanti alla frontale. Queste, rispetto al sensore, hanno una certa angolazione che determina un'emissione non ortogonale al sensore stesso, influenzando dunque l'emissività delle pareti.

Dalla letteratura si evince che, essendo in una condizione di equilibrio termico, l'effetto dell'inclinazione è pressochè trascurabile.

Questo è stato verificato mediante l'installazione di una termocoppia nella parete laterale destra ed il suo valore misurato è stato confrontato con quello valutato dal nuovo prototipo. Dal confronto è emersa una discrepanza di circa 1,2 °C a favore del sensore IR. A questo punto, allo scopo di ridurre al massimo l'errore, sono state cercate in letteratura delle formule per eseguire questa correzione geometrica. Il tentativo è stato vano, dato che, quelle trovate, addirittura aumentavano la discrepanza. Esistono anche modelli di correzione che sfruttano la temperatura dell'aria come parametri, ma anche questi non hanno dato i risultati sperati.

La causa di questa differenza è probabilmente legata alla complessa variazione di geometria della stanza in corrispondenza dell'unione di più pareti. Un altro fattore rilevante potrebbe essere l'estensione delle finestre su tutta la parete frontale, che crea ulteriore disturbo negli spigoli della stanza.

## Processamento dei dati

Quanto descritto finora è probabilmente la causa della differenza sulla temperatura media radiante che si ha durante i momenti più caldi della giornata.

Va però precisato che l'errore medio sulla temperatura media radiante e sul PMV risulta essere accettabile e in linea con quanto simulato.

È fondamentale osservare l'importanza della correzione dell'emissività come mostrato nei grafici riportati di seguito.

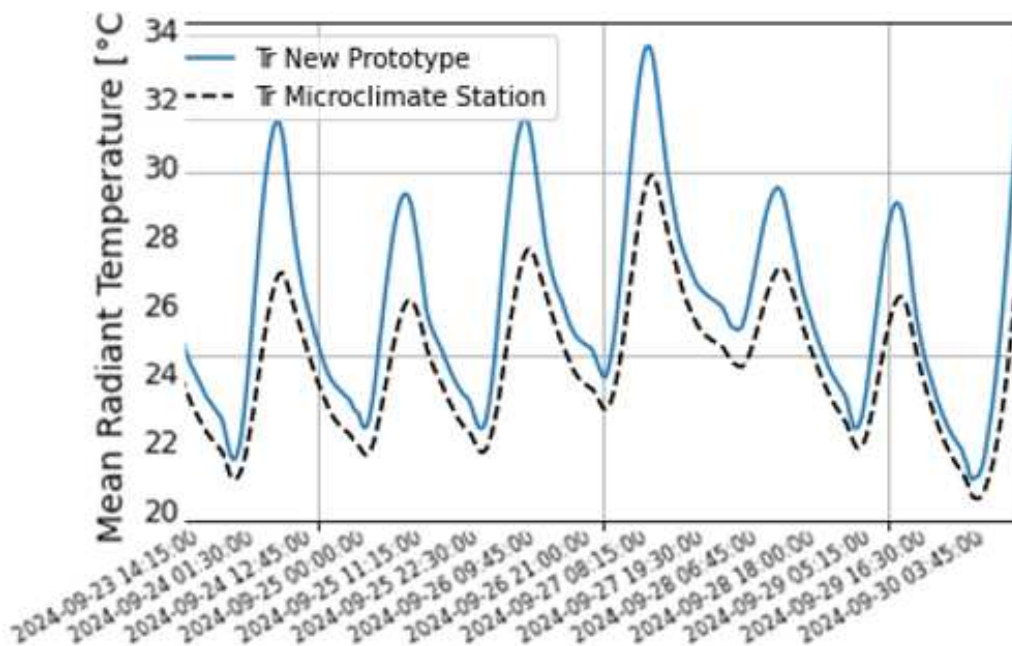


Figura 4.14:  $T_r$  senza la correzione dell'emissività

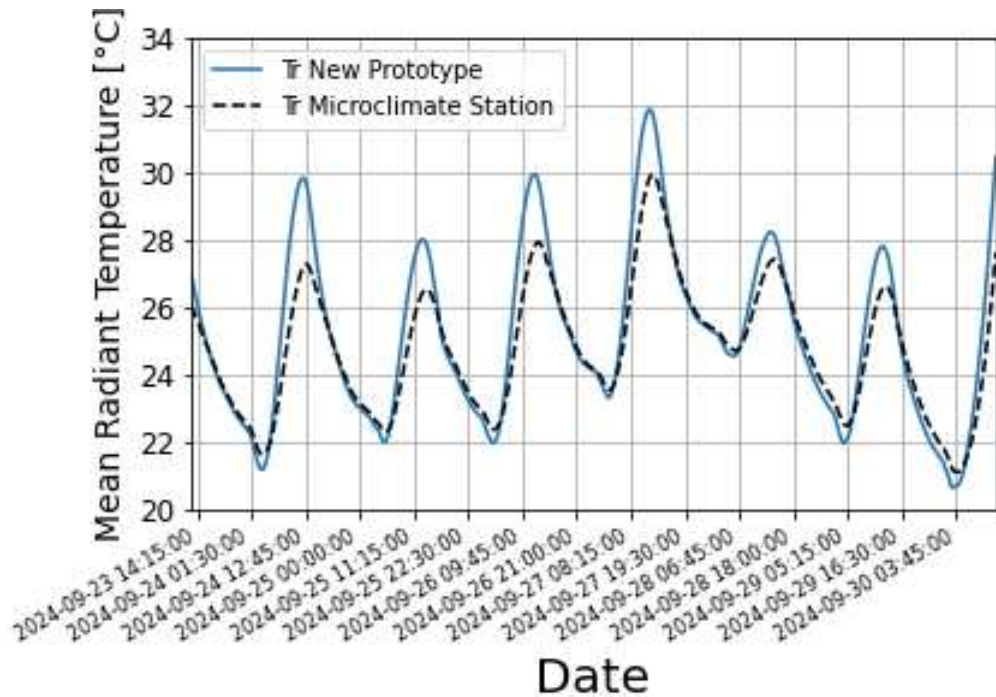


Figura 4.15:  $T_r$  con la correzione dell'emissività

#### 4.3.5 Valutazione indici di comfort

Una volta processati tutti i dati termici, provenienti dal nuovo prototipo, con la metodologia sopra descritta, si procede alla valutazione degli indici di comfort. Questo lo si realizza tramite due script Python utilizzati per effettuare la simulazione del nuovo sensore, opportunamente modificati.

Per rispondere alle esigenze richieste, sono stati in parte modificati. In particolare il programma ci restituisce il confronto diretto tra gli indici valutati con il riferimento (la stazione microclimatica) e quelli valutati con il nuovo prototipo.

Il confronto realizzato è utile per la delibera o meno del sensore.

In particolare, per quanto riguarda il riferimento, abbiamo come grandezze di ingresso:

## *Processamento dei dati*

- Temperatura dell'aria;
- Umidità relativa;
- Temperatura media radiante.

Questi parametri ci vengono direttamente forniti dalla stazione micro-climatica.

Per quanto riguarda il nuovo prototipo abbiamo le seguenti grandezze di ingresso:

- Temperatura dell'aria;
- Umidità relativa;
- Temperatura superficiale delle pareti.

Questo ha senso perchè la differenza tra il riferimento e il nuovo prototipo è limitata solamente alla valutazione della temperatura media radiante. Va precisato che, temperatura dell'aria e umidità relativa sono quelle della stazione, a differenza delle temperature superficiali. Queste ultime sono utilizzate per la valutazione della temperatura media radiante, realizzata dallo script Python stesso.

Una volta elaborati i dati da questi due programmi, otteniamo dei grafici che ci permettono di visualizzare e confrontare il PMV e la temperatura media radiante.

La temperatura media radiante e il PMV sono valutati nelle modalità di seguito descritte.

### **Calcolo temperatura media radiante**

La temperatura media radiante è definita dalla norma ISO 7730 [4] come la temperatura percepita da un individuo a causa della radiazione termica emessa dalle superfici circostanti.

Per la sua valutazione è stato utilizzato il metodo dei fattori angolari che tiene conto dell'influenza di tutte le superfici circostanti, come pareti, pavimenti e soffitti, considerando variabili quali temperatura, dimensione, orientamento e posizione rispetto all'osservatore.

Per il calcolo della temperatura media radiante, si utilizza la formula della norma ISO 7730 [4] di seguito riportata.

$$TR = \sum (T_i \times F_i)$$

Dove:

- $T_i$  è la temperatura di ciascuna superficie circostante (pareti, pavimento, soffitto, ecc.) [°C];
- $F_i$  è il fattore angolare tra la superficie  $i$  e la posizione dell'osservatore.

I fattori angolari sono calcolati in base alla geometria della stanza e alla posizione delle superfici rispetto all'osservatore.

### **Calcolo PMV**

Seguendo l'allegato D della norma ISO 7730 [4], è stato possibile calcolare i valori del PMV.

In particolare sono stati utilizzati i parametri ambientali quali la temperatura dell'aria, la temperatura media radiante e l'umidità relativa.



## *Processamento dei dati*

Va inoltre precisato che, per la valutazione del PMV, sono stati fissati i seguenti valori:

- Tasso metabolico fissato a 1.2;
- Clo fissato a 0.7;
- Velocità dell'aria fissata a 0.01 m/s,

che influenzano notevolmente l'indice di comfort descritto.

## 5 Analisi dati

In questo capitolo vengono descritti i risultati ottenuti dalla misurazione sperimentale descritta.

Analisi eseguita su un totale di 669 campioni acquisiti, con intervallo tra un'acquisizione e l'altra fissato a 15 minuti.

### 5.1 Valutazione temperatura media radiante

Viene di seguito riportato il grafico che descrive il confronto tra le temperature medie radianti valutate con il nuovo prototipo e con la stazione microclimatica.

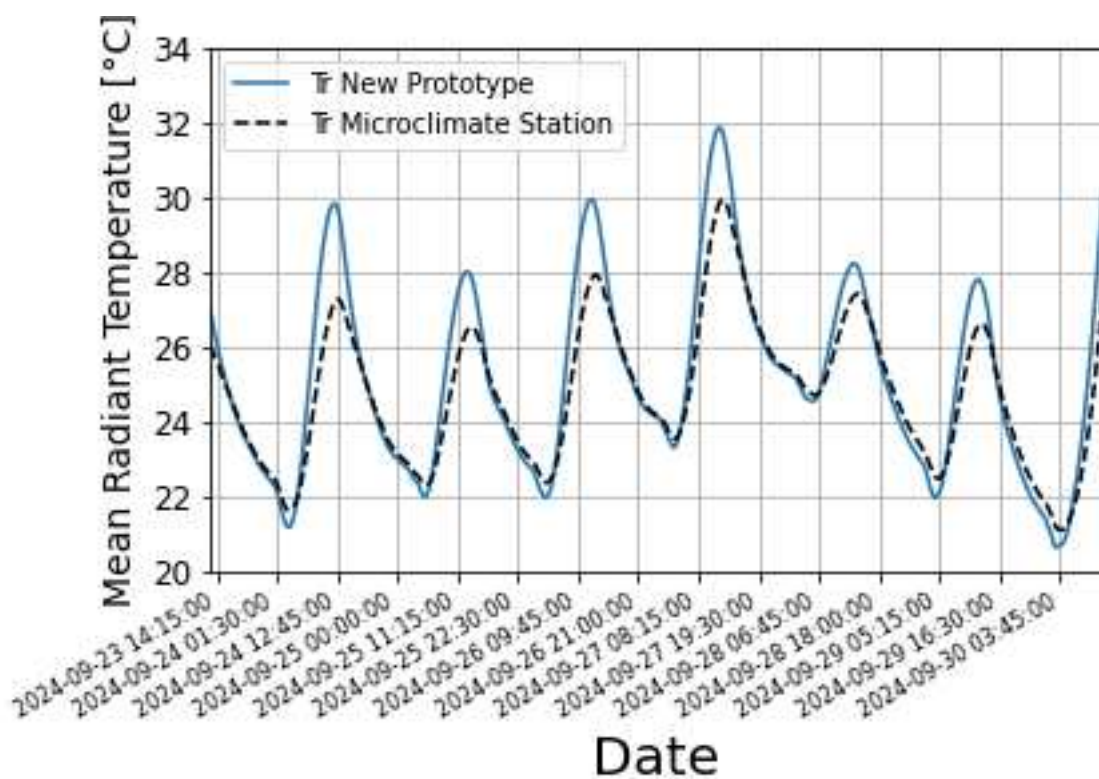


Figura 5.1: Andamento temperatura media radiante

## Valutazione PMV

Osservando il grafico si nota un andamento delle temperature sovrapponibili per gran parte del periodo di misurazione.

Sono però presenti delle differenze che si manifestano nei momenti di picco termico. Queste sono probabilmente dovute alla notevole estensione della superficie vetrata della parete frontale, che crea delle problematiche alla misura del sensore, che scaldando notevolmente l'aria adiacente, disturba ancor di più tale valutazione.

Si può osservare in maniera molto dettagliata l'andamento delle differenze tra le due curve con il grafico di seguito:

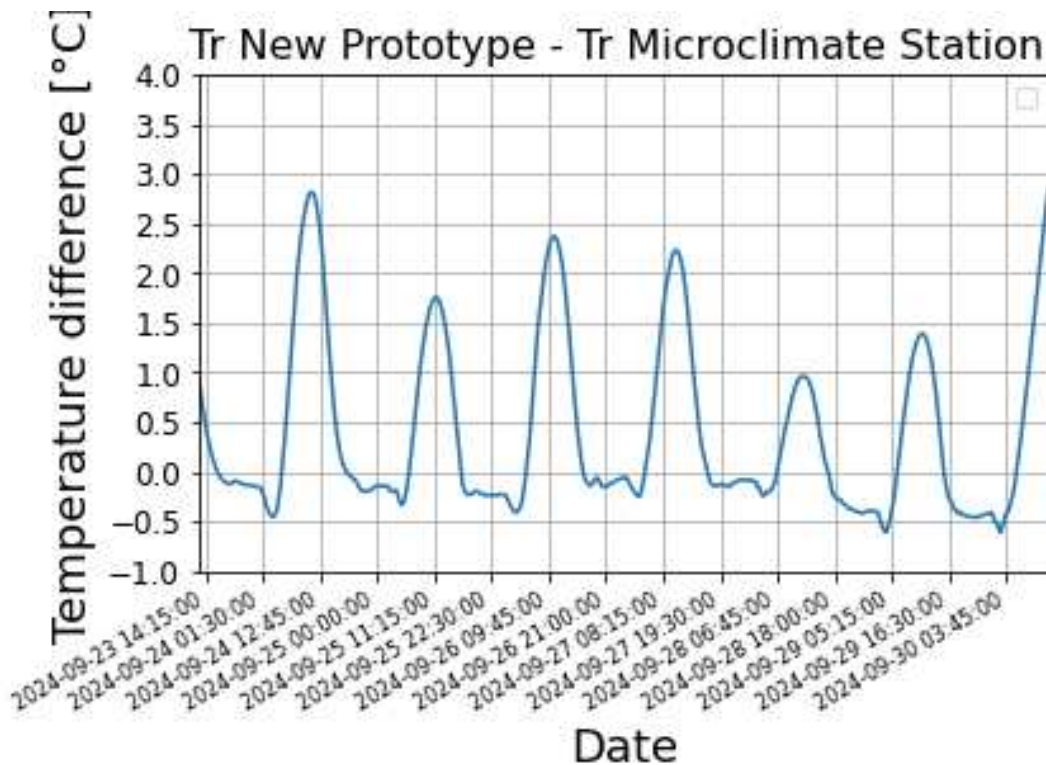


Figura 5.2: Andamento differenza delle temperature medie radianti

## 5.2 Valutazione PMV

Viene di seguito riportato il grafico che descrive il confronto tra il PMV valutato con il nuovo prototipo e con la stazione microclimatica.

## Valutazione PMV

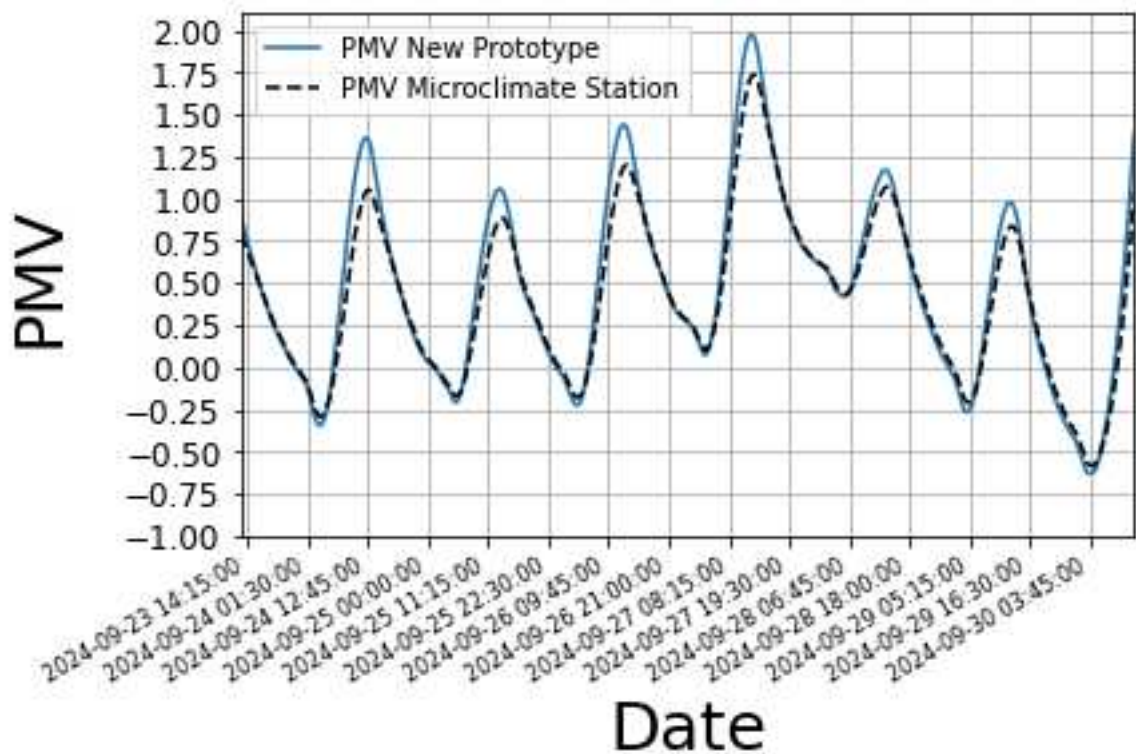


Figura 5.3: Andamento PMV

Anche nel caso del PMV, come per la temperatura media radiante si osserva un andamento sovrapponibile per la gran parte della misurazione tranne nei picchi termici dove si evince una differenza maggiore. Questo è legato all'andamento della temperatura media radiante, che, come visto, presenta una differenza massima durante i momenti più caldi.

L'andamento delle differenze tra le due curve può essere osservato in maniera molto più dettagliata con il seguente grafico:

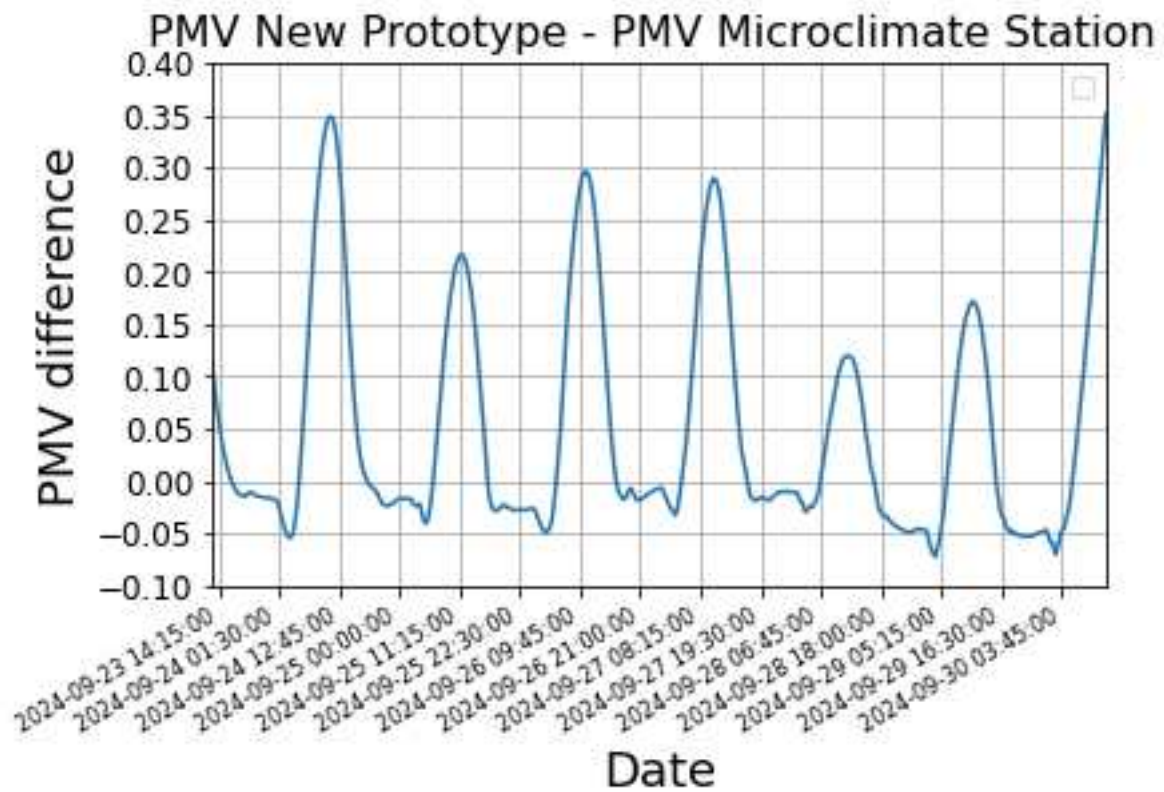


Figura 5.4: Andamento differenza del PMV

### 5.3 Valutazione statistiche

É opportuno fare delle valutazioni statistiche sui grafici ottenuti ma soprattutto sulle differenze riscontrate sulla temperatura media radiante, poi ripercosse sul PMV.

Queste considerazioni possono essere ricavate dai grafici dei residui di seguito riportati.

Histogram of residues:  $\mu = -0.389$ ,  $\sigma = 0.868$  (K=2) [°C]

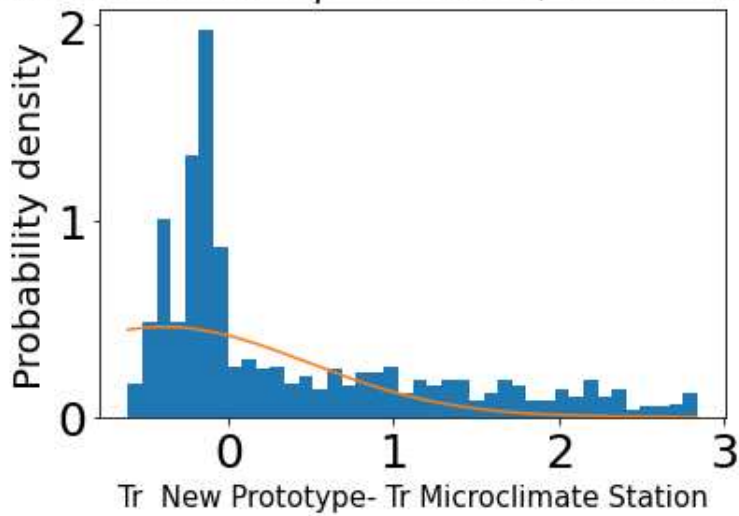


Figura 5.5: Istogramma dei residui della temperatura media radiante

Histogram of residues:  $\mu = -0.049$ ,  $\sigma = 0.107$  (K=2)

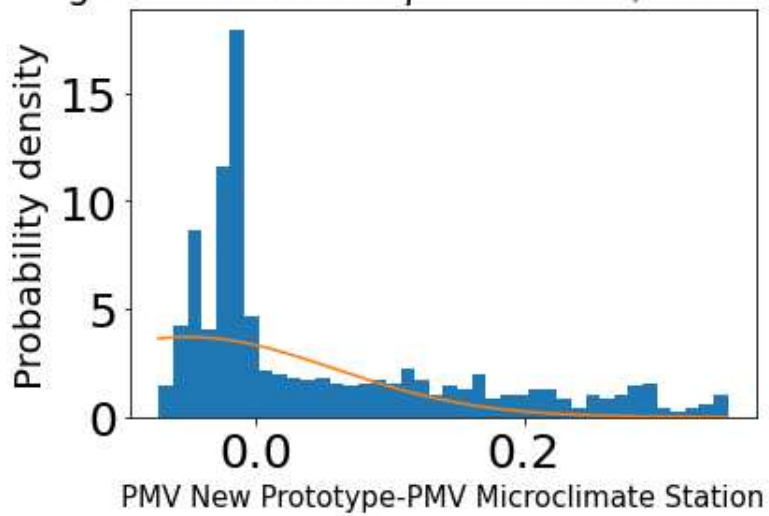


Figura 5.6: Istogramma dei residui del PMV

Da questi possiamo osservare:

- Errore medio sulla temperatura media radiante pari a  $0.389 \pm 0.868$
- Errore medio sul PMV pari a  $0.049 \pm 0.107$

## *Andamento temperatura dell'aria e umidità relativa*

Si evince dunque una piccola ed accettabile sovrastima del nuovo prototipo rispetto al riferimento rappresentato dalla stazione microclimatica.

I dati ottenuti dalla misurazione risultano però in linea con la simulazione precedentemente eseguita dove:

- Errore medio sulla temperatura media radiante pari a  $0.38 \pm 0.16$
- Errore medio sul PMV pari a  $0.05 \pm 0.02$

Questo va ancora di più a rafforzare la validità dei risultati ottenuti.

### **5.4 Andamento temperatura dell'aria e umidità relativa**

Sono di seguito riportate i grafici che descrivono l'andamento della temperatura dell'aria "Ta" e dell'umidità relativa "Rh", due parametri fondamentali nella valutazione del PMV.

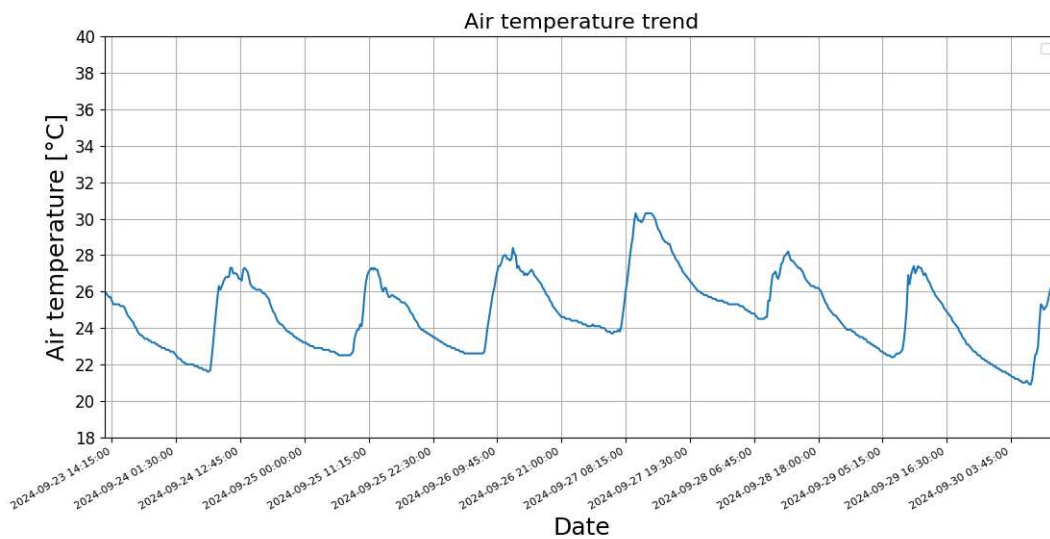


Figura 5.7: Andamento temperatura dell'aria

*Andamento temperatura dell'aria e umidità relativa*

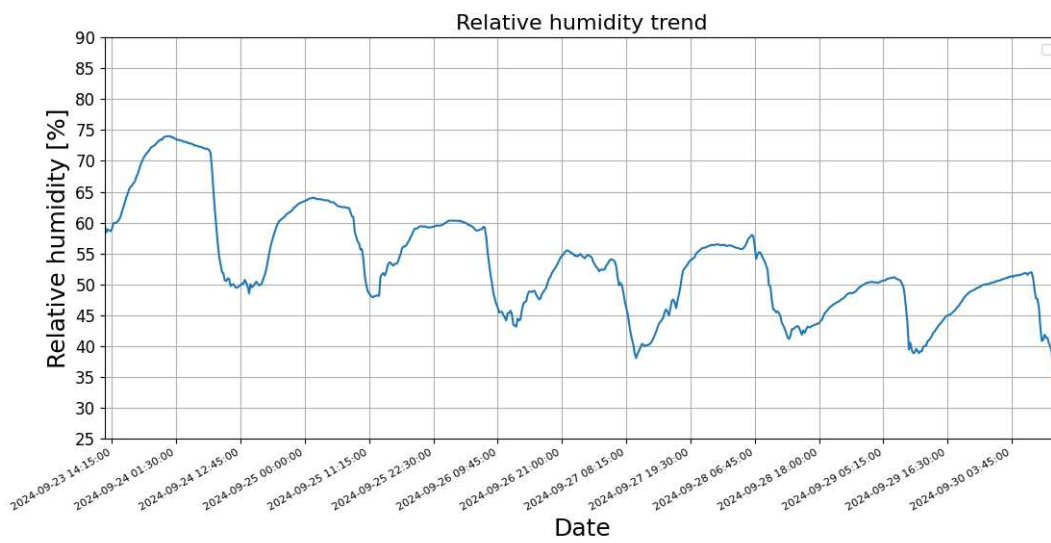


Figura 5.8: Andamento dell'umidità relativa



## 6 Idee e sviluppi futuri

In relazione a quanto detto nell'ultima appendice del capitolo precedente, si consiglia di effettuare misurazioni e valutazioni più approfondite per comprendere l'influenza della variazione geometrica delle pareti circostanti alla frontale.

Se non si riuscisse a risolvere il problema descritto, benchè, come già osservato, sia di poca influenza, si può sempre ricorrere all'idea iniziale del nuovo prototipo, e dunque utilizzare i sensori puntuali Melexis MLX 90614 per la valutazione delle temperature delle pareti laterali, pavimento e soffitto.

Questo però risulta svantaggioso rispetto alla soluzione sviluppata per i seguenti motivi:

- Svantaggi economici;
- Installazione più articolata.

Entrambi legati all'utilizzo di un numero maggiore di sensori.

In conclusione si rendono necessarie un numero di prove maggiori per poter valutare in modo più completo questo nuovo prototipo, concentrandosi anche su ambienti differenti da quello valutato, ricordando però la validità dei risultati ottenuti.

Un'altra idea sui possibili sviluppi futuri è la seguente: sfruttare la grande mole e la bontà dei dati a disposizione per valutazioni più

complete del comfort termico mediante altre funzioni di benessere, al fine di considerare anche la sensazione termica dell'Utente.

## 7 Conclusioni

L'obiettivo principale di questa tesi è stato la validazione del nuovo prototipo del Comfort Eye per la valutazione del comfort termico.

Nel capitolo introduttivo si fanno delle considerazioni di caratteristiche generali sul comfort termico, in particolare sul PMV, un'indice che permette di quantificare il livello di benessere.

Nel secondo capitolo si descrive l'attuale metodo per la valutazione del comfort, e dunque i sistemi Comfort Eye e Comfort Air, descrivendo anche le problematiche che hanno portato allo sviluppo di questo nuovo prototipo.

Nel terzo capitolo viene descritto il nuovo prototipo da un punto di vista tecnico, comunicazione, fase di testing iniziale e gestione dell'acquisizione dati.

Nel quarto capitolo viene descritta la prova sperimentale eseguita, in particolare si fa riferimento in modo approfondito alla strumentazione utilizzata, alla realizzazione esecutiva della prova e a tutto gli step di processamento dati eseguiti.

Nel quinto capitolo viene fatta un'analisi approfondita dei dati precedentemente raccolti e opportunamente processati. In particolare è emersa una buona precisione del nuovo prototipo ed in linea con i dati simulati. L'analisi condotta ha evidenziato un errore di rilevamento medio di  $0,049 \pm 0,107$  ( $k=2$ ) per il pmv tra il nuovo prototipo e l'attuale Comfort Eye, mentre per la temperatura media radiante, l'errore medio

è stato di  $0,389^{\circ}\text{C} \pm 0,868^{\circ}\text{C}$  ( $k=2$ ).

Si può affermare l'effettiva efficacia del nuovo prototipo nella valutazione della temperatura media radiante e, di conseguenza, nel valutare il PMV, anche se, si possono effettuare delle migliorie legate al discorso della correzione geometrica delle pareti circostanti alla frontale.

In particolare abbiamo un miglioramento del Comfort Eye in termini di:

- Semplicità di installazione;
- Miglioramento dell'affidabilità;
- Rumorosità annullata.

In conclusione possiamo certificare che il nuovo prototipo risulta essere maggiormente versatile e meno invasivo rispetto al modello precedente, estendendo la sua applicabilità senza compromettere l'alta precisione nel rilevamento delle misurazioni, ponendo sempre un occhio ad ulteriori potenziali sviluppi e miglioramenti futuri.

# Bibliografija

- [1] Igor Mujan, Aleksandar S Anđelković, Vladimir Munćan, Miroslav Kljajić, and Dragan Ružić. Influence of indoor environmental quality on human health and productivity-a review. *Journal of cleaner production*, 217:646–657, 2019.
- [2] CEN Comite'Europe'en de Normalisation. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. *EN 15251*, 2007.
- [3] Poul O Fanger. Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. 1970.
- [4] Paolo Lenzuni, Daniela Freda, and Michele Del Gaudio. Classification of thermal environments for comfort assessment. *Annals of Occupational Hygiene*, 53(4):325–332, 2009.
- [5] Serena Serroni, Marco Arnesano, Luca Violini, Gian Marco Revel, et al. An iot measurement solution for continuous indoor environmental quality monitoring for buildings renovation. *Acta Imeko*, 10(4):230–238, 2021.