



**Politecnico di Torino**

*Corso di Laurea Magistrale in Architettura per la Sostenibilità*

*A.a. 2023/2024*

*Marzo*

# **VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ AMBIENTALE INDOOR: METODOLOGIE AVANZATE DI MONITORAGGIO**

**Caratterizzazione sperimentale di un living-lab**

**Relatori:**

**Fabio Favoino**

**Valentina Serra**

**Manuela Baracani**

**Candidata:**

**Giada Letizia Belviso**

*“La colpa di Eva è stata quella di voler conoscere, sperimentare, indagare con le proprie forze le leggi che regolano l'universo, la terra, il proprio corpo, di rifiutare l'insegnamento calato dall'alto; in una parola Eva rappresenta la curiosità della scienza contro la passiva accettazione della fede”*  
Margherita Hack

# Abstract

**Keywords:** *Living-lab* - DAQs - Comfort termico - Comfort luminoso - Qualità dell'aria - KPIs

La sfida della decarbonizzazione degli edifici richiede un aumento dell'efficienza energetica garantendo contemporaneamente il benessere degli occupanti. Per questo la valutazione diretta, attraverso misure, e indiretta, attraverso simulazioni, dell'impatto delle azioni di controllo sull'uso dell'energia e della qualità ambientale *indoor* risultano imprescindibili. La crescente disponibilità di sensori a basso costo e l'elevata potenza di calcolo possono supportare un processo decisionale che tenga conto del *performance gap*, dovuto a una progettazione inefficiente avulsa da considerazioni sulle reali condizioni di comfort dell'occupante. Risulta quindi necessario valutare le connessioni che intercorrono tra gli strumenti di misura avanzati e la valutazione finale del progetto architettonico. Attraverso un processo sperimentale, questo lavoro si pone l'obiettivo d'indagare l'influenza della risoluzione dei sistemi d'acquisizione e della disponibilità di dati sulla valutazione della qualità ambientale: confrontando differenti infrastrutture di rilevamento e modelli per il calcolo degli indici di comfort. La sperimentazione ha avuto luogo all'interno di un *living-lab* al Politecnico di Torino, nel quale è stata integrata un'ampia strumentazione di misura, per testare l'interazione occupante-sistema. I DAQs, ovvero: un *Datalogger*, un Multisensore commerciale, una Stazione di Comfort, un *Raspberry* e altri sensori portatili da laboratorio; differiscono in termini di costi, accuratezza, intrusività e risoluzione spaziale. L'ufficio è stato anche dotato di componenti avanzati dell'involucro in aggiunta ai sistemi tradizionali presenti. Il monitoraggio continuo dell'ambiente, durato diverse settimane, ha permesso di effettuare un confronto tra gli strumenti e differenti combinazioni di dati. Inoltre, le procedure di calcolo degli indici di comfort sono state analizzate spazialmente con la finalità di avere una valutazione del progetto d'involucro. Le considerazioni prodotte possono essere un valido supporto per la scelta dell'infrastruttura di rilevamento in relazione all'interazione con l'occupante e alla qualità finale del dato; ad esempio, per il monitoraggio di tecnologie d'involucro trasparente in edifici fortemente vetrati che necessitano di un maggiore controllo rispetto alla radiazione solare diretta.

*The challenge of decarbonising buildings requires an increase in energy efficiency while ensuring the well-being and the comfort of occupants. For this reason, direct evaluation, through measurements, and indirect evaluation, through simulations, of the impact of control actions on energy use and indoor environmental quality are essential for sustainable design. The increasing availability of advanced low-cost sensors and high computing power can support a conscientious decision-making process that takes into account the performance gap, due to inefficient design detached from considerations of the occupant's effective comfort conditions. It's therefore necessary to evaluate the connections between advanced measurement tools and the final evaluation of comfort of architectural design. Through an experimental process, lasting for several weeks, this work aims to investigate the influence of acquisition system resolution and data availability on the evaluation of indoor environmental quality: by comparing different survey infrastructures and models for the calculation and postprocessing of comfort indexes. The experimentation took place within a living-lab at the Polytechnic of Turin, in which extensive measurement instrumentation was integrated to test the occupant-system interaction. The acquisition systems used are: a Datalogger, a commercial Multisensor, a Comfort Station, a Raspberry and other portable laboratory sensor; differ in terms of cost, accuracy, intrusiveness and spatial resolution. The office was also equipped with advanced enclosure components, intended to be evaluated, in addition to the traditional systems present. The continuous monitoring of the environment, which lasted several weeks, allowed for a comparison of instruments and different combinations of data. Furthermore, the calculation procedures of the comfort indices were spatially analysed in order to have an evaluation of the envelope design. The considerations produced can be a valuable support for the selection of the sensing infrastructure in relation to the interaction with the occupant and the final quality of the data; for example, for the monitoring of transparent envelope technologies in heavily glazed buildings that need more control with respect to direct solar radiation.*

# Indice

## Abstract

<b>1. Introduzione</b>	9
<b>2. Stato attuale della ricerca e della legislazione</b>	13
<b>2.1. Sviluppo della normativa in ambito energetico</b>	13
<b>2.1.1. Nearly Zero Energy Building</b>	14
<b>2.1.2. Protocolli valutativi dei progetti</b>	14
<b>2.1.3. Building performance gap</b>	15
<b>2.1.4. Metodologie e sensori di misura dell'IEQ</b>	15
<b>2.2. Comfort termico</b>	17
<b>2.2.1. Indici di performance termica</b>	17
<b>2.2.2. Parametri misurati</b>	22
<b>2.3. Comfort visivo</b>	24
<b>2.3.1. Indici di performance luminosa</b>	24
<b>2.4. Qualità dell'aria</b>	26
<b>2.4.1. Indici di qualità dell'aria interna</b>	26
<b>2.5. Problematiche riscontrate</b>	27
<b>3. Obiettivi e metodologia d'analisi</b>	29
<b>3.1. Processo sperimentale</b>	30
<b>/4. Raccolta dati e fase sperimentale</b>	33
<b>4.1. Fasi della sperimentazione</b>	33
<b>4.2. Strumenti di misura installati</b>	36
<b>4.3. Esiti della valutazione degli strumenti di misura</b>	39

<b>/5a. Sensori di misura</b>	41
<b>5a.1. Temperatura dell'aria (<math>T_a</math>)</b>	42
<b>5a.2. Umidità relativa (RH)</b>	44
<b>5a.3. Illuminamento orizzontale (<math>E_o</math>)</b>	46
<b>5a.4. Illuminamento verticale (<math>E_v</math>)</b>	48
<b>5a.5. Concentrazione di <math>CO_2</math></b>	50
<b>5a.6. Esiti della valutazione dei sensori di misura</b>	52
<b>/5b. Modelli di calcolo</b>	55
<b>5b.1. Modello <math>T_{mr}</math> ISO7726</b>	56
<b>5b.1.1. Modello <math>T_s</math></b>	58
<b>5b.2. Modello <math>\Delta T_{mr}</math></b>	59
<b>5b.2.1. Modello <math>R_{sol(Ev)}</math></b>	62
<b>5b.2.2. Modello <math>R_{sol}</math></b>	62
<b>5b.3. Esiti della valutazione dei modelli di calcolo</b>	64
<b>/5c. Indici di comfort</b>	67
<b>5c.1. Temperatura operativa (<math>T_{op}</math>)</b>	69
<b>5c.2. PMV e PPD</b>	75
<b>5c.3. UDI e DA</b>	84
<b>5c.4. Esiti della valutazione degli indici di comfort</b>	86
<b>/6. Verso un design umanocentrico</b>	89
<b>7. Conclusioni</b>	101

## Indice grafici, immagini e tabelle

## Bibliografia e sitografia

## Ringraziamenti

# 1. Introduzione

Il settore edile, pilastro dello sviluppo e del progresso della società, riveste un ruolo di crescente rilevanza nel dibattito sul cambiamento climatico. Sebbene la produzione architettonica abbia contribuito significativamente alla prosperità economica e all'urbanizzazione globale, è diventato imperativo controllare gli impatti ambientali associati a questa industria, attraverso una riformulazione delle pratiche e delle tecnologie attualmente adottate. Il settore delle costruzioni è responsabile del 39% delle emissioni globali di anidride carbonica e consuma il 36% dell'energia mondiale. Inoltre, i materiali da costruzione generano una quantità significativa di scarti, contribuendo al 50% del totale dei rifiuti solidi globali (UNEP, 2023). L'adozione di tecnologie sostenibili, la progettazione eco-efficiente e l'impiego di materiali a basso impatto ambientale mitigano l'influsso negativo dell'edilizia sul clima, contribuendo notevolmente agli sforzi globali per limitare l'aumento della temperatura media del pianeta. La promozione di approcci più sostenibili non solo riduce l'impronta ecologica dell'industria delle costruzioni, ma innesca un ciclo virtuoso che promuove la sostenibilità a livello globale. Per perseguire gli obiettivi di decarbonizzazione, riducendo il consumo energetico risulta di fondamentale importanza monitorare la qualità ambientale *indoor* (IEQ), con l'obiettivo di limitare il più possibile l'utilizzo degli impianti in un ambiente responsivo rispetto alle esigenze dell'utente finale. La crescente disponibilità di sensori a basso costo e l'elevata potenza di calcolo possono supportare un processo decisionale che tenga conto del *performance gap*, dovuto a una progettazione inefficiente avulsa da considerazioni sulle reali condizioni di comfort. Analizzando la relazione tra la performance e le caratteristiche architettoniche, è possibile definire delle procedure di progettazione che valutino a priori l'impatto sull'occupante.

L'obiettivo di questo lavoro di ricerca è di semplificare le metodologie di monitoraggio ambientale, riducendo i costi senza intaccare la risoluzione del dato finale. Attualmente sul mercato sono disponibili molteplici sistemi di acquisizione dei dati ambientali (DAQs), che presentano caratteristiche molto diverse tra loro, questo rende ardua l'identificazione di uno strumento che si adatti universalmente a ogni situazione. Per poter monitorare uno spazio giornalmente vissuto, come un ufficio, è importante che l'infrastruttura di rilevamento utilizzata non intralci l'attività umana. È possibile definire una metodologia avanzata di monitoraggio e controllo dell'*indoor environmental quality*, che sia economica, compatta e replicabile, senza rinunciare alla qualità del dato? Attraverso una sperimentazione diretta è stato possibile valutare il funzionamento di molteplici strumenti di misura (un *Datalogger*, un Multisensore commerciale, una Stazione di Comfort, un *Raspberry* e altri sensori portatili da laboratorio) rispetto ad attributi quali: il costo, le fasi e il sistema di montaggio, le modalità di download e le componenti. Lo scopo è confrontare l'accuratezza di un sistema *low-cost* e poco intrusivo, che idealmente potrebbe essere replicato in qualsiasi situazione, con quella di un sistema *high-cost*, che presenta un elevato numero di sensori ad alta risoluzione. L'utilizzo di un sistema a basso costo implica l'introduzione di modelli di calcolo che permettano di quantificare il comfort ambientale con la stessa precisione dei sistemi meno economici, ma autonomi. Per questo la ricerca si prefigge di costruire svariati modelli per la valutazione della qualità ambientale, differenziati dal numero di variabili misurate introdotte rispetto alla strumentazione di riferimento. Attraverso la quantificazione degli indici di performance (KPIs) è possibile appurare la risoluzione dei modelli in relazione a un *Gold standard*, rappresentato dal valore direttamente misurato dallo strumento *high-cost*. Un ulteriore intento del lavoro è la parametrizzazione dei modelli che, svincolandosi dal posizionamento dei sensori e dalle caratteristiche architettoniche, valutino le condizioni di comfort per differenti configurazioni dello spazio costruito. Rispetto all'ampia gamma di requisiti dello spazio interno, facendo riferimento agli obiettivi principali e alle risorse presenti, si è deciso di soffermarsi, in un primo momento, sugli aspetti riguardanti il comfort termico, il comfort luminoso e qualità dell'aria, per poi restringere ulteriormente l'analisi al solo comfort termico.

Questa tesi si inserisce in un più ampio progetto di ricerca affrontato dai dottorandi e ricercatori del Gruppo TEBE, afferente al Dipartimento di Energia (DENERG) del Politecnico di Torino. L'intento è la realizzazione di un *living-lab* all'interno degli uffici del Politecnico, con l'obiettivo di monitorare il funzionamento di tecnologie innovative, in un ambiente che permetta il normale svolgimento di azioni da parte di un occupante tipo, per superare quella che è l'attuale valutazione che ha luogo in locali controllati quali le TWINS (shelter progettati per simulare l'interazione tra ambiente interno ed esterno dov'è possibile installare prototipi di tecnologie d'involucro per monitorarne il funzionamento e definirne le caratteristiche fisiche). Questa sperimentazione a sua volta si inserisce in una collaborazione tra enti universitari, nazionali e internazionali, che ha l'obiettivo d'individuare criteri univoci per la valutazione della qualità ambientale *indoor*, confrontando le pratiche adottate nei diversi *living-lab*. Durante il periodo di raccolta dei dati l'ufficio è stato dotato di componenti avanzati dell'involucro, in aggiunta ai sistemi tradizionali presenti, fornendo l'occasione di esaminare il funzionamento delle analisi intraprese anche su tecnologie differenti.

Il processo che ha portato all'elaborazione dei risultati esposti è una componente cruciale del lavoro di tesi. Attraverso la ricerca dei riferimenti, l'analisi dei dati e lavoro sul campo è stato possibile comprendere le connessioni tra l'elaborazione di un progetto architettonico e le indagini sperimentali effettuate dal Gruppo TEBE. Le fasi principali dello sviluppo del lavoro possono essere riassunte nel seguente modo:

- Studio della letteratura esistente e della normativa vigente;



## 2. Stato attuale della ricerca e della legislazione

La normativa e la ricerca relative al comfort dell'edificio attualmente hanno come obiettivo che le condizioni ambientali rispecchino al meglio le esigenze dell'occupante; questo bisogno ha una duplice causa, da un lato gli avanzamenti tecnologici permettono di immaginare un'architettura sempre più malleabile all'occorrenza, dall'altro la crisi climatica ha reso necessaria la riduzione del consumo energetico degli edifici, possibile anche grazie a un controllo continuo delle prestazioni dell'impianto e delle condizioni ambientali interne.

In ambito internazionale gli enti istituzionali, come l'Unione Europea con l'EPBD, promuovono lo sviluppo e l'utilizzo di modalità di misurazione intelligente e controllo attivo in edifici di nuova costruzione e per la ristrutturazione del patrimonio esistente. Le nuove tecnologie permettono e necessitano la creazione di nuovi parametri di comfort, che meglio descrivano le condizioni dell'occupante, e il perfezionamento di quelli esistenti (Ahmad et al., 2016).

### 2.1. Stato attuale della ricerca e della legislazione

Un primo interesse da parte delle istituzioni politiche verso le questioni connesse al consumo energetico e all'inquinamento atmosferico si inizia ad avere intorno agli anni '90 del Novecento. Nel 1992 venne convocata a Rio de Janeiro la *United Nations Conference on Environment and Development* (UNCED) che porta alla costituzione della *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Così nasce il primo documento ufficiale che pone degli obiettivi di riduzione delle emissioni di anidride carbonica, nello specifico si dichiara di voler "stabilizzare [...] le concentrazioni di gas a effetto serra nell'atmosfera a un livello tale che sia esclusa qualsiasi pericolosa interferenza delle attività umane sul sistema climatico" (*United State Commission*, 1992). Il trattato viene sottoscritto da 154 nazioni ed entra in vigore nel 1994. Una definizione più puntuale degli obiettivi si ha con il protocollo di Kyoto del 1997, sottoscritto da 40 paesi, dove vengono incluse delle percentuali limite e degli orizzonti temporali e introdotti i crediti di emissione dei gas serra.

A partire dai primi anni 2000 l'Unione europea emana una serie di direttive che specificano aspetti riguardanti le tematiche introdotte nella UNFCCC e le ampliano con nuovi ragionamenti e temi d'interesse. Nel 2007 si riunisce il Consiglio europeo di Bruxelles per discutere nuovamente su questi temi con lo scopo di prefissarsi degli obiettivi più specifici, dichiarati nel Piano 20 20 20: ridurre del 20% le emissioni di gas serra e aumentare del 20% la produzione di energia da fonti rinnovabili, entro il 2020 (*European Commission*, 2007). È nella direttiva comunitaria del 2010 che si stabiliscono degli obiettivi specifici in campo edilizio imponendo agli Stati membri d'impegnarsi per far sì che entro il 2018 gli edifici pubblici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero e per la fine del 2020 lo siano anche quelli privati (*European Commission*, 2010).

L'Italia recepisce le disposizioni EU fin dal 1976, con la prima Legge sui requisiti minimi d'isolamento e prestazioni obbligatori, riguardanti la realizzazione d'impianti in edifici nuovi e ristrutturati. Nel 2008 entra in vigore una norma fondamentale che definisce univocamente le procedure di calcolo per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, aggiornata nel 2014. L'anno dopo viene accolta la direttiva europea del 2010 riguardante gli edifici ad energia quasi zero, formalizzata attraverso il Decreto Requisiti Minimi, che fissa i metodi di calcolo e i requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici di nuova costruzione e per le ristrutturazioni.

L'evoluzione della normativa riguardante l'ambito energetico è stata accompagnata da un aumento delle direttive riferite all'*indoor environmental quality* (IEQ), guidato dalla crescente consapevolezza dell'importanza di garantire spazi interni sani e confortevoli per gli occupanti. Il processo normativo è stato caratterizzato dal costante miglioramento degli standard e delle linee guida con l'obiettivo di stabilire criteri e requisiti per la progettazione, la costruzione e la gestione degli edifici considerando l'intera gamma di fattori che influenzano il benessere umano (comfort termico, comfort luminoso, qualità dell'aria e comfort acustico).

Il primo documento significativo in questo contesto è l'ASHRAE 62-1989, che stabilisce le linee guida per garantire un'adeguata qualità dell'aria interna attraverso la ventilazione controllata. Parallelamente, l'ASHRAE 55-1992 definisce i criteri necessari per determinare le condizioni termiche accettabili per gli occupanti. Allo stesso modo vengono introdotti principi per il controllo dell'illuminazione e dell'isolamento acustico, specialmente per ambienti pubblici e lavorativi per i quali ci si rende conto come un adeguato controllo della qualità di questi fattori ambientali influenzi il comfort migliorando la produttività. Inoltre, enti come l'*Environmental Protection Agency* (EPA) e l'*Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) hanno giocato un ruolo importante nello sviluppo di standard che connettessero la gestione dell'IEQ alla sicurezza e alla salute umana.

Complessivamente, la regolamentazione e la ricerca nei confronti del comfort ambientale degli edifici si è evoluta

abbracciando una visione olistica del benessere degli occupanti, promuovendo la progettazione di architetture che non siano solo energeticamente efficienti e sostenibili ma anche confortevoli, salubri e produttive.

### 2.1.1. Nearly Zero Energy Building

L'evoluzione normativa riguardante i principi legati alla progettazione sostenibile ha portato alla definizione del *Nearly Zero Energy Building* (NZEB), che indica un edificio con altissima prestazione energetica, raggiunta attraverso un fabbisogno molto basso, dovuto alla performance dell'involucro edilizio e dei dispositivi interni, al quale si risponde grazie all'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, preferibilmente attraverso una produzione autonoma dell'energia. Le caratteristiche su cui agire per ridurre il fabbisogno energetico sono: il miglioramento dell'isolamento termico e della tenuta all'aria, l'orientamento, l'ombreggiamento e l'uso della vegetazione. Inoltre, fondamentale è il miglioramento dell'efficienza energetica delle apparecchiature e dei dispositivi interni, diminuendo così il consumo diretto di elettricità. Ancora più influente è la progettazione dell'impianto di climatizzazione e ventilazione, che se associati a un sistema domotico aumentano le prestazioni di comfort diminuendo il consumo energetico. Tuttavia, questi accorgimenti diventano vani se non sono accompagnati da una progettazione consapevole che tenga conto delle necessità dell'occupante, causa principale dell'*building performance gap*.

I criteri che guidano la progettazione dell'edilizia sostenibile riguardano la qualità dell'aria interna, il comfort termico, l'illuminazione e il rumore, concentrandosi sul risparmio energetico e sul riutilizzo di risorse e non sempre considerando l'impatto che questi possono avere sul benessere personale; per questo la relazione tra ambiente costruito e salute psicofisica è al centro di molte discussioni. Oggi la sfida sta nel realizzare edifici sani, confortevoli, convenienti, sicuri e a basso consumo energetico. L'associazione tra questi fattori risulta per certi versi ancora confusa e incompleta, poiché la temporalità dei processi dinamici e le interazioni che si verificano a diversi livelli non sempre vengono considerati, e la maggior parte degli indicatori e dei metodi di ricerca non sono applicabili e utili. È necessario quindi ricercare nuove metodologie che esprimano l'importanza di questi aspetti per la vita umana, attraverso la validazione scientifica, dei test comparativi o la raccolta e l'analisi dei dati (Xie et al., 2017).

### 2.1.2. Protocolli valutativi dei progetti

Negli anni sono nati numerosi protocolli valutativi, sviluppati per guidare la progettazione e la costruzione di edifici in sintonia con una visione olistica della sostenibilità. Tra i protocolli più diffusi e riconosciuti a livello globale, spiccano il LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), il BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), il WELL *Building Standard* e in Italia l'ITACA (Innovazione e Tecnologia per l'Adattamento e la Certificazione Ambientale).

Sebbene questi sistemi di classificazione certifichino gli edifici in base a molteplici categorie, il loro ruolo nel migliorare il soddisfacimento degli occupanti per la qualità ambientale interna è stato dibattuto a lungo ma non ancora completamente definito. Ad esempio, negli ambienti lavorativi, il livello di soddisfazione influisce significativamente sul fabbisogno energetico, a causa delle azioni adattive che gli utenti esercitano in risposta ai cambiamenti delle condizioni ambientali. La consapevolezza che le persone trascorrono quasi il 90% del loro tempo in ambienti chiusi e che i costi salariali superino le spese d'investimento, ha suscitato un crescente interesse nei confronti del contributo che i sistemi di valutazione *green* possono avere sul miglioramento dell'esperienza sul posto di lavoro (Altomonte, 2019).

Il LEED utilizza una struttura basata su crediti, rispetto ai quali è possibile guadagnare punti per diverse categorie: ubicazione e trasporti, siti sostenibili, efficienza idrica, energia e atmosfera, materiali e risorse, qualità ambientale interna, innovazione e priorità regionale. Ogni categoria è composta da vari crediti, alcuni dei quali sono prerequisiti obbligatori, che valutano le prestazioni del progetto assegnando di conseguenza un punteggio. In base al numero di punti guadagnati si possono raggiungere tre livelli di certificazione: Argento (40-49), Oro (50-59) e Platino (> 80). La categoria IEQ comprende crediti relativi alla qualità dell'aria interna, al comfort termico, al comfort luminoso, alla controllabilità dei sistemi e alle prestazioni acustiche. La distribuzione dei crediti IEQ e il numero di punti differiscono a seconda della versione LEED per il quale è richiesta la certificazione.

Un protocollo che maggiormente mira a promuovere e valutare il benessere degli occupanti è il WELL *Building Standard*, sviluppato dall'*International WELL Building Institute* (IWBI) con l'obiettivo di migliorare la salute e il benessere degli occupanti attraverso una progettazione consapevole. Il WELL *Building Standard* è organizzato in diverse categorie chiamate *Concepts*, ognuna della quale affronta un aspetto specifico del benessere umano: aria, acqua, nutrizione, illuminazione, fitness, comfort e *mind*. L'*indoor environmental quality* gioca un ruolo cruciale all'interno del *Concept comfort*, per ogni dominio dell'IEQ sono definiti requisiti e criteri specifici da rispettare per ottenere i crediti:

- Qualità dell'aria interna: stabilisce limiti massimi per inquinanti come la CO<sub>2</sub>, i VOC e le particelle sospese e inoltre, promuove l'adozione di strategie di ventilazione e purificazione dell'aria per mantenere un ambiente interno salubre;

- Comfort termico: definisce criteri per fattori come la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la velocità dell'aria, favorendo l'utilizzo di sistemi di controllo regolabili e una distribuzione termica uniforme negli spazi interni;
- Illuminazione naturale e artificiale: incoraggia la fruizione della luce naturale attraverso un design architettonico che massimizzi l'ingresso di luce solare negli ambienti interni e inoltre definisce requisiti di uniformità per l'illuminazione artificiale;
- Isolamento acustico: incentiva soluzioni tecnologiche che riducano al minimo la trasmissione del suono tra i divisori e definisce limiti massimi per i livelli di rumore.

A seconda del grado d'eccellenza raggiunto nel promuovere il benessere degli occupanti la certificazione WELL può essere, come per il LEED, di livello *Silver*, *Gold* o *Platinum*.

L'integrazione di considerazioni sulla qualità ambientale interna nei protocolli di certificazione evidenzia la crescente consapevolezza della necessità di coordinazione tra aspetti riguardanti il risparmio energetico e quelli riferiti al benessere umano. La ricerca volta allo studio di queste connessioni è in continuo sviluppo e punta a determinare limiti e indici che identifichino sempre più specificatamente le percezioni dell'occupante.

### 2.1.3. Building performance gap

Il *building performance gap* riassume tutte le problematiche relative al perseguimento di un'architettura che connubi il risparmio energetico e l'attenzione al benessere dell'occupante, rappresenta la differenza tra il consumo d'energia calcolato nella fase di progetto e quello realmente misurato nella fase di utilizzo, il concetto che può essere ulteriormente ampliato per le diverse categorie di performance. Le spiegazioni di questa problematica possono essere diverse: errori costruttivi, un utilizzo sbagliato delle apparecchiature e degli impianti, un'eccessiva semplificazione dei modelli di calcolo utilizzati nella fase di progetto e il comportamento degli occupanti. Attraverso diversi studi si è notato come abitazioni ad alta efficienza inducano gli occupanti a mantenere un livello di comfort più alto, ciò implica un maggiore dispendio di energia non preventivato. Tra i fattori influenti possiamo identificare: la temperatura interna settata, la frequenza di utilizzo e il tempo di accensione degli apparecchi elettrici e dell'acqua calda sanitaria e l'assiduità di ventilazione. Anche fattori come l'età e le risorse economiche degli occupanti influenzano statisticamente l'entità del *gap* (Van den Brom et al., 2018). Il calcolo degli indici di performance tiene conto dei fattori fisici dell'occupante, ma non può considerare il livello di consapevolezza da parte di quest'ultimo rispetto a quelle che sarebbero le buone pratiche che permettono di mantenere l'ambiente confortevole. Quindi risulta necessario tenere in considerazione anche delle discrepanze dovute alla percezione personale del livello di comfort.

### 2.1.4. Metodologie e sensori di misura dell'IEQ

Per il monitoraggio dell'*indoor environmental quality*, sono state sviluppate molteplici metodologie finalizzate alla valutazione dei parametri chiave che influenzano la salute e il benessere degli occupanti, con l'obiettivo comune di rendere sempre più precisa la rappresentazione e il controllo delle condizioni di comfort percepite.

Tra i sistemi di monitoraggio avanzati è doveroso citare SAMBA (*Smart Adaptive Monitoring for Built Environment Applications*), sviluppato dall'IEQ Lab dell'Università di Sydney, per valutare dinamicamente la qualità dell'ambiente costruito. Questo sistema utilizza combinatamente dei sensori wireless, un software avanzato e algoritmi di analisi dei dati per raccogliere ed esaminare in tempo reale i parametri chiave di qualità dell'aria, comfort termico e illuminazione. SAMBA offre un monitoraggio continuo e dettagliato dell'IEQ consentendo di identificare rapidamente eventuali problemi per correggerli. Tuttavia, sono presenti dei limiti, tra cui la necessità di una configurazione e manutenzione complessa della sensoristica, la dipendenza dalla disponibilità di una connessione Internet affidabile e la potenziale complessità nell'interpretazione dei dati raccolti (De Dear et al., 2015). Un altro sistema innovativo è PROMETEO, che utilizza una combinazione di sensori avanzati, dispositivi indossabili e piattaforme digitali per raccogliere, analizzare e visualizzare dati sull'IEQ in tempo reale; offre una visione completa e dettagliata delle condizioni ambientali all'interno degli edifici, consentendo di monitorare e ottimizzare il comfort e la salute degli utenti. Ma come per SAMBA, ci sono alcune sfide associate all'implementazione di PROMETEO, tra cui la necessità di calibrare e mantenere accuratamente i sensori, la complessità nell'integrare diverse fonti di dati e la gestione delle problematiche legate alla privacy e alla sicurezza.

Per questa sperimentazione sono stati studiati strumenti di misura comunemente utilizzati nella pratica sperimentale, tra cui:

- Un *Datalogger*, è un sistema d'acquisizione versatile e programmabile con un'ampia varietà di funzionalità. Presenta diversi canali d'ingresso analogici e digitali che consentono di connettere sensori e strumenti di misura, programmabili con l'ausilio di un software dedicato indicando i dati da acquisire, l'intervallo temporale e la modalità di salvataggio dati. È dotato di una memoria interna che permette il salvataggio di un certo numero di dati in locale, ma presenta anche la possibilità d'inserire una scheda memoria aggiuntiva; offre opzioni di comunicazione come USB e TCP, e può supportare la trasmissione di dati in tempo reale o il trasferimento dei dati archiviati.



- Un **Raspberry**, è sistema di misurazione *low-cost* progettato per svolgere una varietà di compiti di acquisizione dati e controllo tramite un computer a basso costo e di dimensioni ridotte. Il cuore del sistema è un *Raspberry Pi*, un computer a scheda singola, dotato di porte GPIO che consentono di collegare sensori e dispositivi di misurazione. Il computer esegue un software personalizzato che controlla i sensori, acquisisce le misure ed esegue azioni specifiche in base alle condizioni rilevate. È in grado di connettersi a reti Wi-Fi o Ethernet per la trasmissione dei dati, che può avvenire in tempo reale, a un server remoto per un monitoraggio continuo, o archiviati localmente.
- Una **Stazione di Comfort**, è un sistema avanzato che integra diverse tipologie di sensori per il monitoraggio di parametri chiave correlati al comfort, presenta un software di registrazione dati, che può comunicare in diverse modalità e permette la lettura diretta dal sistema d'acquisizione, anche attraverso l'ausilio di grafici e tabelle.
- Un **Multisensore Aircare**, è un sistema compatto e relativamente di piccole dimensioni, progettato per monitorare molteplici variabili relative al comfort ambientale. Presenta un sistema di registrazione che memorizza le letture dei sensori nel tempo inviandole automaticamente a un server centralizzato. Necessita di un'alimentazione continua per permettere il corretto funzionamento di tutti i sensori. Ha la capacità di notificare il superamento del limite di soglie preimpostate per determinati parametri, come elevati livelli di CO<sub>2</sub>.

Esistono altre tipologie di strumenti di misura molto efficaci, che però non è stato possibile usare in fase d'analisi, come:

- I dispositivi personali, che stanno giocando un ruolo sempre più significativo, fornendo agli individui un accesso immediato e continuo ai dati relativi al loro benessere, grazie alla combinazione di sensori che misurano parametri come la frequenza cardiaca, l'attività fisica ecc. I dispositivi variano in forma e funzionalità (smartwatch, smartphone ecc.), forniscono informazioni preziose per il miglioramento delle abitudini di vita, prendendo decisioni informate sulla propria salute e sulle condizioni ambientali, e possono raccogliere opinioni personali da parte degli utenti attraverso dei questionari (Miller et al., 2022).
- Le termocamere, sono un sofisticato strumento di misura che cattura immagini termiche, traducendo le radiazioni infrarosse emesse dalle superfici; ha la capacità di rilevare variazioni di temperatura minime, visualizzando dettagli termici al di là delle possibilità di altri strumenti. In commercio sono disponibili diversi modelli che consentono la registrazione termica in tempo reale, l'analisi dei dati e la generazione di report dettagliati.
- Il cubo radiante (mini.RES Cube Sensor), è un sensore sperimentale messo in commercio da CHAOS Lab, misura la temperatura media radiante tramite la media dei valori direzionali planari delle sei facce del cubo, inoltre su un angolo è posizionato un sensore termoigrometrico. È possibile scaricare i dati istantanei tramite Bluetooth da un'applicazione con cui effettuare anche la programmazione delle impostazioni d'acquisizione. Presenta uno schermo dove è possibile visualizzare le misure raccolte dal sensore, la data, l'ora, le impostazioni di raccolta dei dati e la percentuale della batteria (Meggers et al., 2022).

Nonostante i numerosi progressi raggiunti nell'ambito del monitoraggio dell'IEQ, esistono ancora alcuni limiti e sfide da affrontare, tra cui: l'affidabilità dei sensori, che possono essere soggetti a deriva o deterioramento nel tempo, influenzando l'accuratezza e l'affidabilità delle misurazioni; le interferenze dovute all'ambiente circostante, che può influenzare le misurazioni; la calibrazione e la manutenzione dei sensori, che deve essere effettuata regolarmente per garantire la precisione delle misure nel tempo; la complessità nella gestione e nell'interpretazione dei dati, che necessita di competenze specializzate; i costi dei sensori e del mantenimento dei sistemi di monitoraggio, che limitano un'adozione diffusa. A dispetto dell'evoluzione tecnologica, le metodologie e i sensori di misura dell'IEQ presentano ancora questi limiti che non permettono di garantire un monitoraggio accurato e affidabile nel tempo. Attraverso ulteriori sviluppi tecnici e miglioramenti nella progettazione dei sensori e dei sistemi, sarà possibile superare tali sfide e migliorare ulteriormente la qualità dell'ambiente costruito per il benessere e la salute degli occupanti.

## 2.2. Comfort termico

Per comprendere a fondo come agire per migliorare il monitoraggio dell'IEQ è necessario sviscerare i parametri e i domini dei quali si occuperà questo progetto di ricerca. L'ASHRAE 55 (2017) definisce il comfort termico come "lo stato mentale che esprime soddisfazione per l'ambiente termico e che viene valutato soggettivamente". Nel processo di ricerca, che va avanti dagli anni '70, si è reso sempre più evidente che l'iniziativa soggettiva dell'occupante ha un notevole impatto sul comfort termico. L'essere umano è un soggetto omeotermo, quindi, anche se sottoposto a condizioni estreme, per un certo periodo di tempo riesce a stabilizzare la temperatura interna grazie alla termoregolazione; questa interazione tra ambiente e individuo è al centro di molti studi.

La performance termica di un ambiente dipende da un'ampia gamma di fattori, peculiarità che ha portato alla nascita di diversi modelli e indici di comfort, ma non tutti sono riconosciuti dagli standard internazionali. L'ASHRAE 55 e la norma ISO 7730, si basano sul modello di Fanger, che risulta però limitante per alcune tipologie d'ambiente, per questo i nuovi modelli cercano di superare questi vincoli sfruttando la raccolta di dati per aumentare la precisione delle previsioni (Zhao et al., 2021).

### 2.2.1. Indici di performance termica

Per valutare un ambiente dal punto di vista del comfort termico bisogna basarsi sugli indici di comfort, definiti dalle normative, che classificano lo spazio rispetto a range.

INDICI DI PERFORMANCE TERMICA A BREVE TERMINE		
Indice	Fonte	Definizione
Temperatura operativa (T <sub>op</sub> )	ISO 7726	Rappresenta la temperatura uniforme di un immaginario involucro nero in cui un occupante scambia la stessa quantità di calore, per irraggiamento e convezione, che scambierebbe nell'ambiente reale non uniforme
Voto medio previsto (PMV)	ISO 7730	Prevede il valore medio dei voti di un ampio gruppo di persone su una scala di sensazione termica a 7 punti, basata sul bilancio termico del corpo umano
Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD)	ISO 7730	Stabilisce una previsione quantitativa della percentuale di persone insoddisfatte, dal punto di vista termico, che si sentono troppo fresche o troppo calde

Tabella 01. Indici di performance termica a breve termine

#### Temperatura operativa (T<sub>op</sub>)

La norma ISO 7726 definisce la temperatura operativa come "la temperatura uniforme di un involucro in cui un occupante scambierebbe la stessa quantità di calore per irraggiamento e convezione dell'ambiente, non uniforme, esistente", essa dipende fondamentalmente da tre variabili: temperatura dell'aria, temperatura radiante e velocità dell'aria. L'equazione principale per il calcolo della T<sub>op</sub> è:

$$T_{op} = \frac{h_c \cdot T_a + h_r \cdot T_r}{h_c + h_r} \quad (1)$$

Dove:

T<sub>a</sub> = temperatura dell'aria (°C)

T<sub>r</sub> = temperatura radiante (°C)

h<sub>c</sub> = coefficiente di trasmissione convettiva (W/m<sup>2</sup>K)

h<sub>r</sub> = coefficiente di trasmissione radiativa (W/m<sup>2</sup>K)

Rispetto alla casistica più comune, in cui la velocità dell'aria è minore di 0,2 m/s e la differenza tra la temperatura dell'aria e la temperatura radiante è minore di 4°C, la temperatura operativa può essere calcolata come la media tra queste. Per una maggiore precisione si può utilizzare la seguente formula:

$$T_{op} = A \cdot T_a + (1 - A) \cdot T_r \quad (2)$$

Il valore di A dipende dai valori di velocità dell'aria:

se  $V_a < 0,2$  m/s  $\Rightarrow A = 0,5$

$0,2 < V_a < 0,6$  m/s  $\Rightarrow A = 0,6$

$0,6 < V_a < 1$  m/s  $\Rightarrow A = 0,7$

Inoltre, può essere calcolata come:

$$T_{op} = \frac{T_a \cdot \sqrt{10 \cdot V_a} + T_r}{1 + \sqrt{10 \cdot V_a}} \quad (3)$$

### Range di temperatura operativa

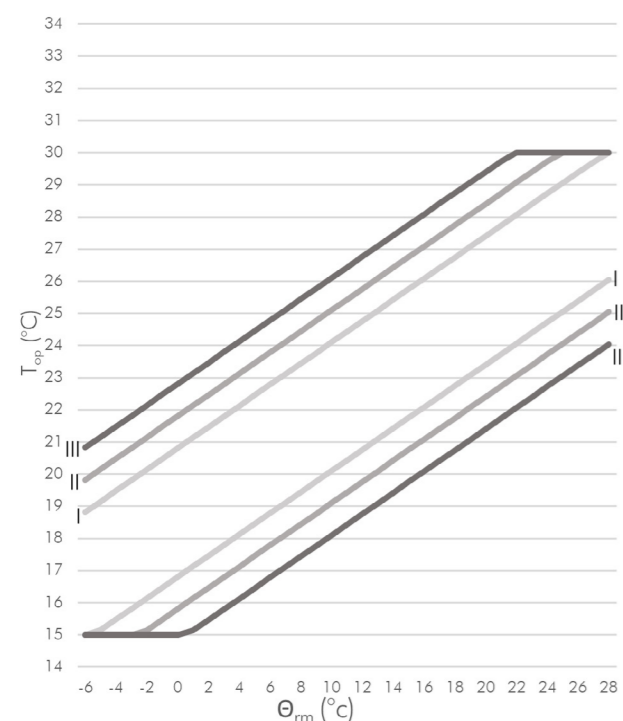
I limiti di temperatura operativa da rispettare dipendono dal tipo di ambiente da verificare. Per gli edifici adibiti a uffici, o utilizzati principalmente per l'occupazione umana con attività prevalentemente sedentaria, che non presentano un sistema di climatizzazione attivo, dove vi è facile accesso a finestre apribili e gli occupanti possono modificare liberamente il proprio abbigliamento, è possibile utilizzare i range calcolati rispetto alla *outdoor running mean temperature* ( $\theta_{rm}$ ). Questi si basano sul principio che in un ambiente non climatizzato, il fattore che maggiormente influenza il comfort termico dell'occupante è la temperatura esterna, nello specifico le temperature esterne medie riferite alla settimana precedente al giorno preso in considerazione (per via della capacità termica intrinseca nell'edificio) (BS ENE 16798-1, 2019). Inoltre, si tiene conto della capacità d'adattamento dell'occupante alle temperature stagionali esterne e della possibilità che l'individuo modifichi autonomamente le condizioni al contorno, come ad esempio il vestiario, per migliorare le proprie condizioni di comfort. Per questi motivi, la teoria del comfort adattivo prende in considerazione dei range molto più ampi che meglio si adattano a queste tipologie d'ambiente.

$$\theta_{rm} = \frac{(\theta_{ed-1} + 0,8 \theta_{ed-2} + 0,6 \theta_{ed-3} + 0,5 \theta_{ed-4} + 0,4 \theta_{ed-5} + 0,3 \theta_{ed-6} + 0,2 \theta_{ed-7})}{3,8} \quad (4)$$

Dove:

$\theta_{rm}$  = outdoor running mean temperature (°C)

$\theta_{ed-n}$  = temperatura media di n giorni precedente (°C)



Le equazioni rappresentate nel grafico sono:

Categoria I

Limite superiore:  $\theta_{max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 2$

Limite inferiore:  $\theta_{min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 2$

Categoria II

Limite superiore:  $\theta_{max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 3$

Limite inferiore:  $\theta_{min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 3$

Categoria III

Limite superiore:  $\theta_{max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 4$

Limite inferiore:  $\theta_{min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 4$

Per un massimo di 30°C per il limite superiore e di 15°C per il limite inferiore.

Grafico 01. Range di temperatura operativa per ambienti non climatizzati

Se prendiamo in considerazione l'ambiente quando il sistema di climatizzazione è attivo, ci si può basare su limiti standard definiti in base al tipo di attività e isolamento dei vestiti (PD CEN/TR 16798-2:2019).

RANGE DI TEMPERATURA OPERATIVA PER AMBIENTI CLIMATIZZATI			
Tipo di edificio/spazio	Categoria	$T_{op}$ (°C) minima per la stagione invernale (~ 1 clo)	$T_{op}$ (°C) massima per la stagione estiva (~ 0,5 clo)
Uffici e simili (ufficio singolo, ufficio open space, sala conferenze, auditorium, aula, ristorante) Attività sedentaria ~ 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
	IV	18,0	28,0

Tabella 02. Range di temperatura operativa per ambienti climatizzati

### Voto medio previsto (PMV)

La teoria di Fanger ha cambiato lo studio sul comfort termico, superando gli studi precedenti che proponevano fino a centinaia di fattori influenti, e stabilendo una formula matematica dipendente solo da sei parametri. Il modello PMV non è applicabile agli ambienti dinamici, tiene conto solo di ambienti uniformi e stazionari, e non risulta adeguato per i climi caldi e umidi, per questo è messo in dubbio da molti ricercatori (Zhao et al., 2021).

La norma ISO 7730 definisce il PMV come "un indice che prevede il valore medio dei voti di un ampio gruppo di persone sulla scala di sensazione termica a 7 punti, basato sul bilancio termico del corpo umano".

La scala punti della sensazione termica:

Hot= +3  
Warm= +2  
Slightly warm= +1  
Neutral= 0  
Slightly cool= -1  
Cool= -2  
Cold= -3

Il PMV può essere calcolato tramite le seguenti equazioni:

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \{(M - W) - 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - T_a)\} \quad (5)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - T_a)\} \quad (6)$$

$$\text{Se } 2,38 \cdot |t_{cl} - T_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{V_a} \Rightarrow h_c = 2,38 \cdot |t_{cl} - T_a|^{0,25} \quad (7)$$

$$\text{Se } 2,38 \cdot |t_{cl} - T_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{V_a} \Rightarrow h_c = 12,1 \cdot \sqrt{V_a} \quad (8)$$

$$\text{Se } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2\text{K/W} \Rightarrow f_{cl} = 1 + 1,290 \cdot I_{cl} \quad (9)$$

$$\text{Se } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{K/W} \Rightarrow f_{cl} = 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} \quad (10)$$

Dove:

M= tasso di calore metabolico (W/m<sup>2</sup>)

W= potere meccanico effettivo (W/m<sup>2</sup>)

I<sub>cl</sub>= isolamento degli indumenti (m<sup>2</sup>K/W)

f<sub>cl</sub>= fattore di vista degli indumenti

T<sub>a</sub>= temperatura dell'aria (°C)

T<sub>r</sub>= temperatura radiante (°C)

V<sub>a</sub>= velocità dell'aria (m/s)

p<sub>a</sub>= pressione del vapore acqueo (Pa)

h<sub>c</sub>= coefficiente di trasmissione convettiva (W/m<sup>2</sup>K)

t<sub>cl</sub>= temperatura della superficie degli indumenti (°C)

Il PMV può essere calcolato per diverse combinazioni delle variabili elencate e le equazioni per t<sub>cl</sub> e h<sub>c</sub> possono essere risolte mediante iterazione. L'indice può essere usato solo per valori di PMV compresi tra -2 e +2, e quando i sei parametri rientrano nei seguenti intervalli:

46 < M < 232 W/m<sup>2</sup> (0,8-4 met)

0 < I<sub>cl</sub> < 0,310 m<sup>2</sup>K/W (0-2 clo)

10 < T<sub>a</sub> < 30 °C

10 < T<sub>r</sub> < 40 °C

0 < V<sub>a</sub> < 1 m/s

0 < p<sub>a</sub> < 2700 Pa

Per il calcolo del PMV, oltre alla formula appena esposta, possono essere usati sensori specifici o tabelle presenti nell'Annex E nella norma ISO 7730.

Con il tempo sono state introdotte delle varianti per adeguare il PMV a situazioni specifiche: l'aPMV, per fornire prestazioni migliori per climi caldi e umidi; l'ePMV, per edifici ventilati naturalmente in climi umidi; l'nPMV, per edifici ventilati meccanicamente, con l'obiettivo di equilibrare la differenza tra la previsione del modello e la sensazione termica degli occupanti (Enescu, 2017).

### Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD)

Il modello PPD calcola la percentuale di persone insoddisfatte per un certo comfort termico, basandosi sul PMV calcolato.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (11)$$

All'intervallo accettabile secondo l'ASHRAE 55 (-0,5 < PMV < +0,5) corrisponde a un PPD < 10% (Enescu, 2017).

Categoria	PPD (%)	PMV
I	<6	-0,2 < PMV < +0,2
II	<10	-0,5 < PMV < +0,5
III	<15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	<25	-1,0 < PMV < +1,0

Per avere una classificazione definitiva di un ambiente è necessario analizzare la performance sul lungo termine. Sono molti gli studi che si sono impegnati a valutare e confrontare tra loro gli indici di performance a lungo termine per il comfort termico, cercando di definire quelli che meglio rappresentano le condizioni dell'occupante.

Tabella 03. Range di PMV e limiti di PPD per ambienti climatizzati

INDICI DI PERFORMANCE TERMICA A LUNGO TERMINE		
Indice	Fonte	Definizione
Ore di superamento del PMV	Santos Silvia A., Ghisi E., Lamberts R. (2016)	Somma delle ore d'occupazione in cui i valori di PMV superano l'intervallo definito dalla categoria
Ore di superamento della temperatura operativa	Santos Silvia A., Ghisi E., Lamberts R. (2016)	Somma delle ore d'occupazione in cui i valori di T <sub>op</sub> superano il range di T <sub>op</sub> ottimale
Percentuale al di fuori dell'intervallo di PMV	Santos Silvia A., Ghisi E., Lamberts R. (2016)	Percentuale del tempo d'occupazione in cui i valori di PMV superano l'intervallo definito dalla categoria
Percentuale al di fuori dell'intervallo di temperatura operativa	Santos Silvia A., Ghisi E., Lamberts R. (2016)	Percentuale del tempo d'occupazione in cui i valori di T <sub>op</sub> superano il range di T <sub>op</sub> ottimale
Media di PPD	Santos Silvia A., Ghisi E., Lamberts R. (2016)	Media dei valori di PPD
Somma di PPD	Santos Silvia A., Ghisi E., Lamberts R. (2016)	Somma dei valori di PPD
Gradi-ora di temperatura operativa	PD CEN/TR 16798-2:2019	Somma del tempo d'occupazione pesato in funzione alla quantità di gradi di superamento della temperatura operativa rispetto al limite definito dalla categoria.
PMV pesato	PD CEN/TR 16798-2:2019	Somma del tempo d'occupazione pesato in funzione di un fattore che rappresenta il PPD sul PPD limite definito dalla categoria

Tabella 04. Indici di performance termica a lungo termine

PD CEN/TR 16798-2:2019 definisce tre metodi di valutazione degli indici di comfort nel lungo periodo.

### Metodo A – Percentuale al di fuori del range

Richiede di calcolare il numero o la percentuale di ore, facendo riferimento a un intervallo d'occupazione, per le quali il PMV o la temperatura operativa sono al di fuori del range definito dalla categoria.

$$h_{ex}(PMV) = \sum_{i=1}^n \begin{cases} \text{se } PMV_{(LL)} < PMV_{(i)} < PMV_{(UL)} & | 0 \\ \text{se } PMV_{(i)} < PMV_{(LL)} \text{ o } PMV_{(i)} > PMV_{(UL)} & | 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\% h_{ex}(PMV) = \frac{100 \cdot \sum_{i=1}^n \begin{cases} \text{se } PMV_{(LL)} < PMV_{(i)} < PMV_{(UL)} & | 0 \\ \text{se } PMV_{(i)} < PMV_{(LL)} \text{ o } PMV_{(i)} > PMV_{(UL)} & | 1 \end{cases}}{n} \quad (13)$$

Dove:

h<sub>ex</sub>(PMV) = somma delle ore in cui il PMV supera il limite (h)  
 %h<sub>ex</sub>(PMV) = percentuale delle ore in cui il PMV supera il limite (%)  
 PMV<sub>(LL)</sub> = valore del limite inferiore di PMV  
 PMV<sub>(UL)</sub> = valore del limite superiore di PMV

$$h_{ex}(T_{op}) = \sum_{i=1}^n \begin{cases} \text{se } T_{op(LL)} < T_{op(i)} < T_{op(UL)} & | 0 \\ \text{se } T_{op(i)} < T_{op(LL)} \text{ o } T_{op(i)} > T_{op(UL)} & | 1 \end{cases} \quad (14)$$

$$\% h_{ex}(T_{op}) = \frac{100 \cdot \sum_{i=1}^n \begin{cases} \text{se } T_{op(LL)} < T_{op(i)} < T_{op(UL)} & | 0 \\ \text{se } T_{op(i)} < T_{op(LL)} \text{ o } T_{op(i)} > T_{op(UL)} & | 1 \end{cases}}{n} \quad (15)$$

Dove:

h<sub>ex</sub>(T<sub>op</sub>) = somma delle ore in cui la T<sub>op</sub> supera il limite (h)  
 %h<sub>ex</sub>(T<sub>op</sub>) = percentuale delle ore in cui la T<sub>op</sub> supera il limite (%)  
 T<sub>op(LL)</sub> = valore del limite inferiore di T<sub>op</sub> (°C)  
 T<sub>op(UL)</sub> = valore del limite superiore di T<sub>op</sub> (°C)

### Metodo B – Gradi-ora

Il tempo, in cui l'ambiente è occupato, durante il quale la temperatura operativa oltrepassa i limiti definiti dai range viene pesato in funzione alla quantità di gradi di superamento del limite (definito dalla categoria).

$$h_w(T_{op}) = \sum_{i=1}^n wf \cdot t \quad (16)$$

per la stagione estiva:

$$wf = \begin{cases} \text{se } T_{op(LL)} < T_{op} < T_{op(UL)} & | 0 \\ \text{se } T_{op} > T_{op(UL)} & | T_{op} - T_{op(UL)} \end{cases} \quad (17)$$

per la stagione invernale:

$$wf = \begin{cases} \text{se } T_{op(LL)} < T_{op} < T_{op(UL)} & | 0 \\ \text{se } T_{op} < T_{op(LL)} & | T_{op(LL)} - T_{op} \end{cases} \quad (18)$$

Dove:

h<sub>w</sub>(T<sub>op</sub>) = somma pesata delle ore (°C)  
 wf = fattore di pesatura (°C)  
 t = tempo

### Metodo C – PPD pesato

Il tempo, in cui l'ambiente è occupato, durante il quale il PMV oltrepassa il range viene pesato in funzione di un fattore che dipende dal PPD. Partendo da una distribuzione del PMV su base annuale e dalla relazione tra PMV e PPD, si calcola quanto segue:

$$h_w(PMV) = \sum_{i=1}^n wf \cdot h_{oc} \quad (19)$$

per la stagione estiva:

$$wf = \begin{cases} \text{se } PMV_{(LL)} < PMV < PMV_{(UL)} & | 0 \\ \text{se } PMV > PMV_{(UL)} & | \frac{PPD_{PMV}}{PPD_{PMV(UL)}} \end{cases} \quad (20)$$

per la stagione invernale:

$$wf = \begin{cases} \text{se } PMV_{(LL)} < PMV < PMV_{(UL)} & | 0 \\ \text{se } PMV < PMV_{(LL)} & | \frac{PPD_{PMV}}{PPD_{PMV(LL)}} \end{cases} \quad (21)$$

Dove:

h<sub>w</sub>(PMV) = somma pesata delle ore  
 wf = fattore di pesatura  
 h<sub>oc</sub> = ore d'occupazione (h)  
 PPD<sub>PMV</sub> = PPD riferito al PMV analizzato  
 PPD<sub>PMV(LL)</sub> = PPD riferito al limite inferiore di PMV  
 PPD<sub>PMV(UL)</sub> = PPD riferito al limite superiore di PMV

Richiedere che le condizioni rientrino in una determinata categoria per il 100 % del tempo può portare alla progettazione di sistemi che per la maggior parte dell'anno funzionano a bassa efficienza, pertanto viene considerata una certa deviazione.

x%/y% del tempo	Settimana		Mese		Anno	
	20%	50%	12%	25%	3%	6%
Ore d'occupazione	8	20	21	44	63	126
	40		175		2100	
Ore totali	33	58	86	180	259	518
	166		720		8640	

Tabella 05. Percentuali di deviazione per le ore d'occupazione

La categoria che presenta una percentuale di ore di rispetto dei requisiti uguale o maggiore dell'intervallo x%/y% (definito dall'intervallo di tempo) definisce l'ambiente oggetto dell'analisi. Questa valutazione può essere fatta anche confrontando i risultati settimanali, mensili e annuali per avere una categorizzazione più definita nel momento in cui si dispone di tutte le misure richieste.

### 2.2.2. Parametri misurati

Gli indici di performance per essere calcolati necessitano di un'ampia gamma di parametri riferiti all'ambiente e all'occupante che devono essere misurati o, solo alcuni di loro, definiti a priori in base a delle caratteristiche note.

#### Tasso di calore metabolico (M)

Il tasso di calore metabolico rappresenta la produzione netta di calore del corpo umano in un dato periodo di tempo, e usa come unità di misura i met (1 met = 58,2 W/m<sup>2</sup>); Il suo valore è sempre positivo, poiché il corpo produce sempre calore, e può variare dai 45 W/m<sup>2</sup>, per una persona a riposo, ai 500 W/m<sup>2</sup>, per una persona che corre (Enescu, 2017).

Rispetto al grado di precisione richiesto e alle risorse disponibili, si possono utilizzare metodi predittivi o di misura differenti. Per definire il tasso metabolico ci si può basare su valori stabiliti rispetto al tipo di azione effettuata dall'occupante, o si possono utilizzare equazioni basate su valori antropometrici (peso corporeo, altezza, età e livello di attività fisica) un esempio è quella di Harris Benedict.

Alcuni valori di riferimento rispetto al tipo di attività fisica sono:

- 1,2 met: riposo (seduto o sdraiato)
- 1,5-1,8 met: lavoro d'ufficio (seduto)
- 2,0-2,8 met: lavoro leggero
- 3,0-4,0 met: lavoro moderato
- 4,5-6,0 met: lavoro pesante
- >6,0 met: attività fisica intensa

Inoltre, è possibile scegliere tra diversi metodi di misurazione, alcuni si basano sull'analisi del respiro e della sua composizione gassosa altri, come la calorimetria diretta, misurano le variazioni di temperatura all'interno dell'ambiente. I dispositivi personali indossabili sono attualmente la scelta migliore per il monitoraggio continuo in ambiente, essi riescono a stimare il tasso di calore metabolico combinando tra loro, attraverso algoritmi specifici, diversi sensori come: accelerometri e monitor cardiaci.

#### Isolamento degli indumenti (I<sub>cl</sub>)

L'isolamento degli indumenti definisce la quantità d'isolamento termico indossata dall'occupante, misurato in clo (1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>K/W); 1 clo rappresenta il livello d'isolamento termico a cui una persona mantiene una temperatura corporea stabile e confortevole a una temperatura interna di 21°C.

Valori di riferimento di I<sub>cl</sub> per tipo di abbigliamento:

- 0,1 clo: nudo
- 0,6 clo: abiti leggeri da camera
- 1,0 clo: abbigliamento estivo leggero
- 1,5 clo: abbigliamento primaverile/autunnale
- 2,0 clo: abbigliamento invernale pesante
- 2,5 clo: abbigliamento invernale molto pesante

#### Velocità dell'aria (V<sub>a</sub>)

La velocità dell'aria descrive la velocità del movimento dell'aria per un determinato periodo di tempo, ed è definita dalla grandezza e dalla direzione del flusso d'aria; nel comfort termico è comune considerare solo la velocità

(Brembilla et al., 2022). La velocità dell'aria influisce sul trasferimento di calore per convezione tra occupante e ambiente, può produrre situazioni di disagio quando è superiore 0,2 m/s o quando un qualsiasi movimento d'aria viene combinato con temperatura fredde (Enescu, 2017).

#### Umidità relativa (RH)

L'umidità relativa, riferita a una temperatura nota, è il rapporto tra la pressione di vapore acqueo misurata e la quantità massima di pressione di vapore acqueo che l'aria potrebbe contenere, solitamente è espresso in percentuale. L'umidità relativa suggerita per mantenere una condizione di comfort è compresa tra il 30% e il 60%, per valori superiori o inferiori si creano delle situazioni di disagio termico. Molti studi ritengono che l'umidità relativa influisca su: la percezione dell'area interna, la salute degli occupanti, il consumo energetico e risulta avere una grande influenza sul bilancio termico del corpo umano in ambienti caldi (Enescu, 2017).

#### Temperatura dell'aria (T<sub>a</sub>)

La temperatura dell'aria, o temperatura del bulbo secco, è la temperatura dell'aria interna che circonda l'occupante. L'intervallo di temperatura raccomandato generalmente è compreso tra i 18°C e i 23°C, con una differenza di temperatura tra le zone minore di 1°C (Enescu, 2017).

La misura della temperatura dell'aria dipende dalla posizione nello spazio, in particolare sono definiti tre livelli di altezza: caviglia, 0,1 m; vita, 0,6 m per gli occupanti seduti e 1,1 m per quelli in piedi; testa, 1,1 m per gli occupanti seduti e 1,7 m per quelli in piedi (Brembilla et al., 2022).

#### Temperatura media radiante (T<sub>mr</sub>)

La temperatura media radiante può essere definita come la temperatura uniforme di un involucro immaginario in cui il trasferimento di calore radiante dal corpo umano è uguale al trasferimento di calore radiante nell'involucro reale non uniforme. Può essere misurata direttamente da strumenti come il globotermometro o il cubo radiante, tenendo come altezza di riferimento il centro del corpo dell'occupante. In alternativa, la temperatura media radiante può essere calcolata tramite i valori misurati delle temperature superficiali delle pareti interne, correlate al posizionamento rispetto all'occupante e alle loro dimensioni, attraverso i fattori di vista (Brembilla et al., 2022). La procedura è definita nella norma ISO 7726:

$$T_r = \sum_{i=1}^n T_{s_i} \cdot F_n \quad (22)$$

Dove:

$$F_n = F_{max} \cdot (1 - e^{-(a/c)/\tau}) \cdot (1 - e^{-(b/c)/\gamma}) \quad (23)$$

$$\tau = A + B \cdot (a/c) \quad (24)$$

$$\gamma = C + D \cdot (b/c) + E \cdot (a/c) \quad (25)$$

	F <sub>max</sub>	A	B	C	D	E
Persona seduta - Superfici verticali	0,12	1,22	0,17	0,72	0,09	0,05
Persona seduta - Superfici orizzontali	0,12	1,4	0,130	0,95	0,080	0,06
Persona in piedi - Superfici verticali	0,120	1,24	0,17	0,62	0,08	0,05
Persona in piedi - Superfici orizzontali	0,12	1,6	0,13	1,23	0,05	0,04

Tabella 06. Fattori per il calcolo del fattore di vista

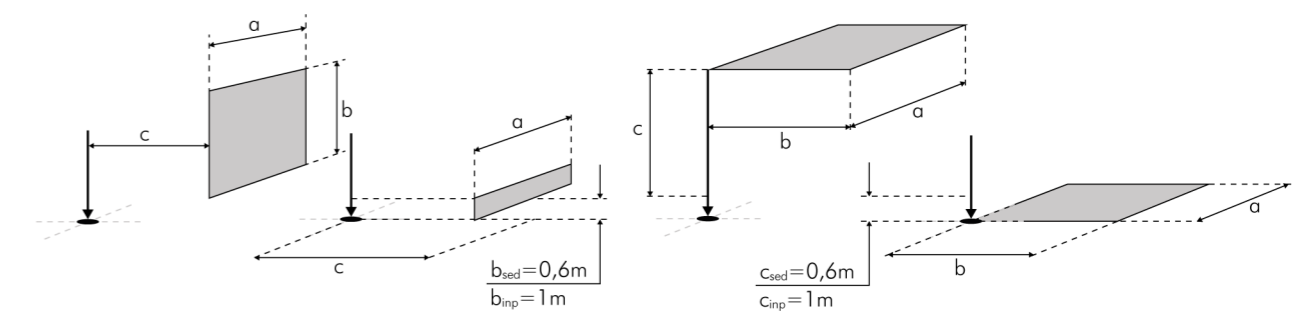


Immagine 02. Dimensioni per il calcolo del fattore di vista

In questa formulazione non viene considerata la componente di radiazione solare diretta, ci sono diversi modelli di calcolo pensati appositamente per compensare questa mancanza (Cap. 5b.2.).

## 2.3. Comfort visivo

Un'illuminazione adeguata all'interno dell'ambiente, specialmente quando parliamo di spazi lavorativi, è necessaria per poter svolgere compiti visivi in maniera efficiente e adeguata, ed è ancora più essenziale se si tratta di azioni ripetitive o da effettuare per un periodo prolungato di tempo. L'illuminazione, oltre a migliorare le prestazioni e il benessere personale, influisce sui ritmi circadiani e sull'umore (BS EN 12464:2021).

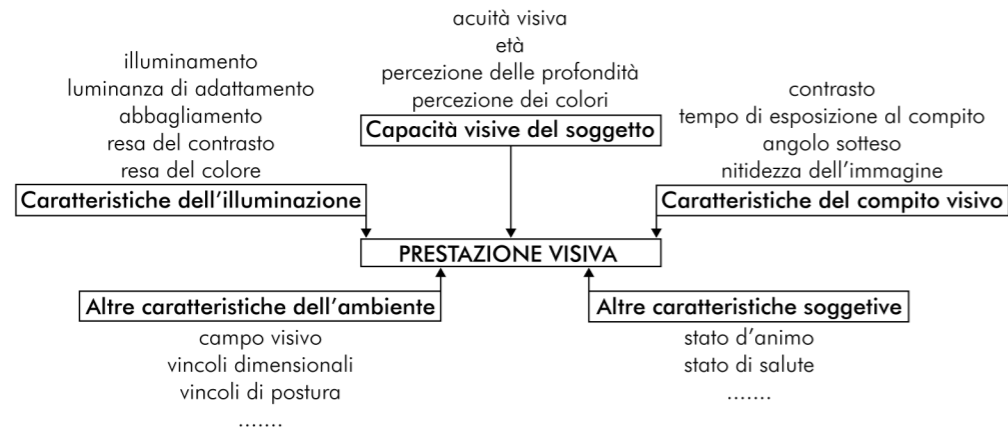


Immagine 03. Caratteristiche della prestazione visiva

Per valutare un ambiente rispetto alla qualità luminosa bisogna considerare in primo luogo se la luce è sufficiente per svolgere il compito visivo richiesto e poi se sono presenti delle fonti di disagio. La grandezza che permette di valutare se la luce è sufficiente è l'illuminamento che misura la quantità di luce che colpisce una superficie, ed è misurato in lux. Solitamente viene usato per valutare l'illuminazione minima necessaria per lo svolgimento di un determinato compito, con riferimento al piano orizzontale di lavoro. Il disagio visivo può essere determinato tramite l'illuminamento verticale e la luminanza, che rappresenta la quantità di luce emessa o riflessa da una superficie in una determinata direzione, misurata in candele per metro quadro ( $cd/m^2$ ); vengono per lo più utilizzate per la valutazione dell'abbagliamento (Brembilla et al., 2022).

### 2.3.1. Indici di performance luminosa

Attualmente l'unico parametro normato da decreti-legge è il Fattore di Luce Diurna (FLD) definito dalla Circolare ministeriale 3151/67 come il "rapporto tra l'illuminamento medio dell'ambiente chiuso e l'illuminamento che si avrebbe nelle stesse condizioni di tempo e luogo su una superficie orizzontale esposta all'aperto, in modo da ricevere luce dall'intera volta celeste senza irraggiamento diretto del sole".

$$FLD_m = \frac{A_f \cdot \tau_i}{(1 - \rho_{i,m}) \cdot A_{tot}} \cdot \varepsilon \cdot \Psi \quad (26)$$

Dove:

$A_f$  = superficie vetrata netta della finestra ( $m^2$ )

$\tau_i$  = fattore di trasmissione luminosa del vetro

$\rho_{i,m}$  = fattore di riflessione luminosa medio ponderato delle superfici interne dell'ambiente

$A_{tot}$  = superficie totale dell'ambiente ( $m^2$ )

$\varepsilon$  = fattore finestra (1 per superfici orizzontali prive di ostruzioni; 0,5 per superfici verticali prive di ostruzioni; < 0,5 per superfici verticali in presenza di ostruzioni)

$\Psi$  = fattore di riduzione del fattore finestra

Il Fattore di Luce Diurna è un buon indicatore dell'efficienza di un sistema d'illuminazione naturale, ma essendo indipendente dal tempo e dalle condizioni ambientali esterne non rappresenta adeguatamente le condizioni reali in una situazione specifica. Nei locali regolarmente occupati deve essere garantito un fattore medio di luce diurna maggiore del 2%, che diventa maggiore del 3% se facciamo riferimento ad ambienti a uso didattico o laboratoriale.

Per superare le mancanze dovute alle semplificazioni dell'FLD sono nate nuove tecniche di modellazione della luce diurna basata sul clima (CBDM) che sono diventate comuni nei sistemi di valutazione degli edifici. Questi modelli sono basati principalmente sull'illuminamento orizzontale, la differenza è che sono caratterizzati dalla dimensione temporale utilizzata per quantificare le variazioni giornaliere e stagionali dei livelli di luce diurna.

INDICI DI PERFORMANCE LUMINOSA A LUNGO TERMINE		
Indice	Fonte	Definizione
<b>Illuminamento diurno utile (UDI)</b>	Mardaljevic J. e Nabil A. (2005)	Percentuale di tempo occupato in cui l'illuminamento è in un intervallo utile (100 - 3000 lx)
<b>Autonomia diurna (DA)</b>	Walkenhorst O. et al. (2002)	Percentuale di tempo occupato in cui l'illuminamento supera il requisito di illuminamento prescritto dalla norma EN 12464-1
<b>Autonomia diurna Spaziale (sDA)</b>	LEED	Percentuale di punti dello spazio in cui si ha un valore di Autonomia diurna maggiore del 50 %
<b>Esposizione solare Annuale (ASE)</b>	LEED	Percentuale di punti dello spazio in cui si ha un illuminamento dovuto esclusivamente alla radiazione solare diretta ( $E > 1000$ lx per più di 250 ore annue)
<b>Probabilità di abbagliamento (DGPs)</b>	Wienold J., Christoffersen J. (2006)	Percentuale di occupanti disturbati da una situazione di abbagliamento da luce diurna

Tabella 07. Indici di performance luminosa a lungo termine

Tutti questi indici fanno riferimento al tempo occupato, cioè quando gli utenti sono effettivamente presenti nell'ambiente considerato, ed escluso il DGPs gli altri indici vengono definiti rispetto al piano di lavoro, solitamente considerato ad un'altezza di 90 cm. Inoltre, lo UDI e la DA presentano delle ulteriori categorizzazioni differenziate dall'intervallo d'illuminamento preso in considerazione.

#### UDI<sub>100-3000</sub> (UDI<sub>achieved</sub>)

Indica la percentuale di tempo occupato in cui l'illuminamento è nell'intervallo 100 – 3000 lx, può essere ulteriormente suddiviso in:

UDI<sub>100-300</sub> => 100 lx <E< 300 lx

UDI<sub>300-500</sub> => 300 lx <E< 500 lx

UDI<sub>500-3000</sub> => 500 lx <E< 3000 lx

#### UDI<sub>100</sub> (UDI<sub>fell-short</sub>)

Indica la percentuale di tempo in cui l'illuminamento è inferiore a 100 lx (intervallo in cui si accende inevitabilmente la luce elettrica).

#### UDI<sub>3000</sub> (UDI<sub>exceeded</sub>)

Indica la percentuale di tempo in cui l'illuminamento è superiore a 3000 lx (intervallo in cui è possibile che si verifichino problemi di discomfort visivo o termico).

$$UDI_{100} + UDI_{100-3000} + UDI_{3000} = 100\%$$

#### DA

Indica la percentuale di tempo occupato in cui l'illuminamento è superiore al requisito d'illuminamento prescritto dalla norma EN 12464-1 per l'attività considerata.

#### DA<sub>con</sub>

Indica la percentuale di tempo occupato in cui l'illuminamento è superiore al requisito d'illuminamento prescritto dalla norma EN 12464-1 per l'attività considerata (500 lx per gli uffici); inoltre, riconosce un credito parziale a tutti gli istanti temporali in cui l'illuminamento è al di sotto del requisito.

#### DA<sub>max</sub>

Indica la percentuale di tempo occupato in cui l'illuminamento è superiore a dieci volte il requisito d'illuminamento prescritto dalla norma EN 12464-1 per l'attività considerata (5000 lx per gli uffici); per valori di E superiori a tale soglia incrementata, è possibile che ci sia penetrazione di luce solare diretta in ambiente.

Questi indici e procedure riguardano la fase di progettazione dell'edificio, basandosi prevalentemente sulla simulazione. La normativa e i sistemi di valutazione forniscono ulteriori indicazioni per la verifica in loco negli edifici esistenti, ma si basano principalmente su misurazioni a campione e campagne di misurazione a breve termine. Tuttavia, i dati di monitoraggio possono essere utilizzati anche nel processo di verifica della conformità e di certificazione degli edifici esistenti.

La norma BS EN 17037:2018+A1:2021 prescrive le percentuali di spazio e di tempo, rispetto a tre intensità d'illuminamento, necessarie per valutare l'illuminamento naturale sul lungo termine.

Livello raccomandato	Illuminamento E (lx)	Frazione di spazio (%)	Frazione di tempo (%)
Minimo	300	95%	50%
Medio	500	95%	50%
Massimo	750	95%	50%

Tabella 08. Percentuali per la valutazione della performance luminosa a lungo termine

## 2.4. Qualità dell'aria

L'esposizione prolungata a elevati livelli d'inquinanti in spazi chiusi può avere un significativo impatto sulla salute respiratoria e cardiovascolare, la pericolosità aumenta se sono presenti patologie preesistenti. Le cause dell'aumento d'inquinanti nell'ambiente possono essere sia naturali che antropiche, situate esternamente o internamente all'ambiente (Brembilla et al., 2022). Gli inquinanti da prendere in considerazione sono:

- Particolato (PM), comprese le fibre, di diverse dimensioni (es: fumo di tabacco ambientale, amianto);
- Inquinanti atmosferici inorganici (es: ad esempio biossido di azoto, ossidi di azoto, monossido di carbonio, anidride carbonica e ozono);
- Inquinanti organici dell'aria, come i composti organici volatili (VOC) (es: formaldeide) e i composti organici semivolatili (SVOC);
- Radiazioni presenti nell'aria (es: radon);
- Inquinanti biologici (es: muffe, acari della polvere, pollini, peli e forfora).

Il rapporto RCPCH/RCP (2020) sull'aria interna e la salute dei bambini riassume le fonti tipiche di ciascuno di questi inquinanti (Brembilla et al., 2022).

### 2.4.1. Indici di qualità dell'aria interna

Per la valutazione della qualità dell'aria interna, la metrica più comunemente utilizzata è la concentrazione d'inquinanti, espressa come quantità d'inquinante per unità di volume d'aria. La concentrazione d'inquinante è tipicamente analizzata tramite dati statistici descrittivi o presentata come digrammi di serie temporali che mostrano le variazioni nel tempo. Le linee guida nella maggior parte dei casi si esprimono rispetto a soglie di concentrazione massima degli inquinanti calcolate in media su un periodo definito di tempo, dai 15 minuti alle 24 ore, o come medie annuali. Inoltre, poiché la concentrazione d'inquinanti all'interno degli edifici può variare nel tempo, è fondamentale un monitoraggio continuo o per periodi di tempo, descritti dalle linee guida (Brembilla et al., 2022).

Non è sempre possibile misurare tutti gli inquinanti, per questo talvolta vengono monitorati solo alcuni proxy per la qualità dell'aria e della ventilazione. Uno di questi è la CO<sub>2</sub>, comunemente usato per valutare la ventilazione, solitamente si trova in concentrazione relativamente moderata negli ambienti interni, a livelli bassi non ha impatti significativi sulla salute. Negli spazi chiusi la CO<sub>2</sub> viene principalmente emessa dagli occupanti, per questo a livelli elevati è un indicatore di ventilazione inadeguata, mentre a basse concentrazioni non si può escludere la presenza di altri inquinanti provenienti da fonti esterne. Per valutare efficacemente la concentrazione di CO<sub>2</sub> è necessario far riferimento ai ppm esterni, considerati come valore di partenza al quale aggiungere un certo Delta rispetto alla categoria di riferimento.

Categoria	Corrispondente di CO <sub>2</sub> al di sopra della concentrazione esterna (ppm)
I	550
II	800
III	1350
IV	1350

Tabella 09. Valori da aggiungere alla concentrazione esterna di CO<sub>2</sub> per il calcolo dei limiti di accettabilità

Un altro indicatore è il totale dei composti organici volatili (TVOC), per i quali non esistono linee guida basate sulla salute, la soglia di esposizione media su otto ore è di 300 µg/m<sup>3</sup> (Brembilla et al., 2022).

Inoltre, esistono indici che combinano le misurazioni effettuate sui diversi inquinanti per avere una valutazione generale dell'ambiente interno. L'indice di Qualità dell'Aria Interna (IAQI), questo indice tiene conto di diversi inquinanti comuni come il biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>), il monossido di carbonio (CO), le particelle sospese e altri composti organici volatili (VOC). L'indice di Qualità dell'Aria per la Salute (IHQI), valuta la qualità dell'aria interna concentrandosi maggiormente sugli impatti che questi possono avere sulla salute umana, rispetto a parametri legati alla salute respiratoria e generale. I parametri utilizzati per il calcolo di questi indici possono variare da un luogo all'altro e nel rispetto delle normative locali.

## 2.5. Problematiche riscontrate

Attualmente la ricerca in campo di comfort ambientale negli edifici cerca di superare la legislazione e i sistemi di certificazione basati su indici e parametri che non rispecchiano pienamente le condizioni di benessere e salute degli occupanti. Per quanto riguarda il comfort termico il problema principale è da identificarsi nelle molte variabili necessarie per il calcolo degli indici che richiedono un elevato numero di sensori; in situazioni comuni, dove l'ambiente è giornalmente vissuto, è difficile pensare di poter utilizzare un elevato numero di sensori di alta qualità, come nel sistema avanzato SAMBA. Inoltre, questi indici vengono principalmente utilizzati per la valutazione di edifici costruiti e non sono molti gli studi che invece ne usufruiscono per la definizione delle caratteristiche dell'edificio nella fase di progetto, anche perché a differenza del comfort luminoso non sono presenti delle tecniche di modellazione spaziale avanzata come quella CBDM. Grazie alla nascita di queste tecniche di modellazione e previsione degli indici di comfort luminoso ne sono nati di nuovi, più performanti, che però non sono stati ancora standardizzati a livello normativo ma vengono esclusivamente richiesti da alcuni enti di valutazione dell'edificio (es: LEED). Dal punto di vista della valutazione della qualità dell'aria interna è difficile riuscire a misurare tutte le tipologie d'inquinanti, per questo solitamente ci si basa esclusivamente sulla CO<sub>2</sub>, per la quale risulta comunque fondamentale un'accortezza rispetto alla tipologia di sensore e al suo posizionamento.

Con questa esposizione si cerca di portare alla luce le problematiche che nelle pagine successive verranno approfondite e rispetto alle quali si intende dare un contributo, ne esistono sicuramente delle altre, forse anche più evidenti, che però non essendo argomento della ricerca non si è ritenuto necessario trattare. Nello specifico il progetto di tesi intende indagare gli aspetti riguardanti l'accuratezza della misura e del calcolo degli indici di qualità ambientale interna a diversi livelli, approfondendo quelli riguardanti il comfort termico. Il confronto tra molteplici strumenti di misura permette di valutare la ricaduta che un fattore molto influente come il costo può avere sulla qualità del dato finale. Infine, viene analizzato come l'introduzione di modelli di calcolo da un lato minimizzi l'utilizzo dei sensori e dall'altro permetta di ampliare la valutazione introducendo considerazioni sulla spazializzazione dei livelli di comfort.

### 3. Obiettivi e metodologia d'analisi

Per rispettare i principi di progettazione sostenibile che il settore edile attualmente richiede è essenziale una riduzione del consumo energetico negli edifici e il mantenimento di condizioni di salute e benessere, per questo risulta necessario monitorare e controllare la qualità ambientale *indoor* in modo da limitare il più possibile l'utilizzo degli impianti in un edificio responsivo rispetto alle esigenze dell'occupante. La ricerca è impegnata nell'analisi di diversi sistemi che misurino, valutino e controllino le condizioni di comfort, che però presentano delle limitazioni legate alla manutenzione della sensoristica, alla gestione dei dati e alla compatibilità con ambienti giornalmente occupati. Da qui nasce la *research question* a cui cerca di rispondere questo lavoro di tesi: è possibile definire una metodologia avanzata di monitoraggio e controllo dell'*indoor environmental quality*, che sia economica, compatta e replicabile, senza rinunciare alla qualità del dato?

L'obiettivo della sperimentazione che verrà esposta di seguito, è la valutazione di una metodologia *low-cost* di monitoraggio e controllo dell'IEQ dell'edificio, superando le problematiche dell'attuale ricerca nel campo, che vede la continua sperimentazione di sistemi di misura avanzati e dinamici che però ripropongono tre problematiche principali: costi elevati, ingombri eccessivi e complessità di gestione.

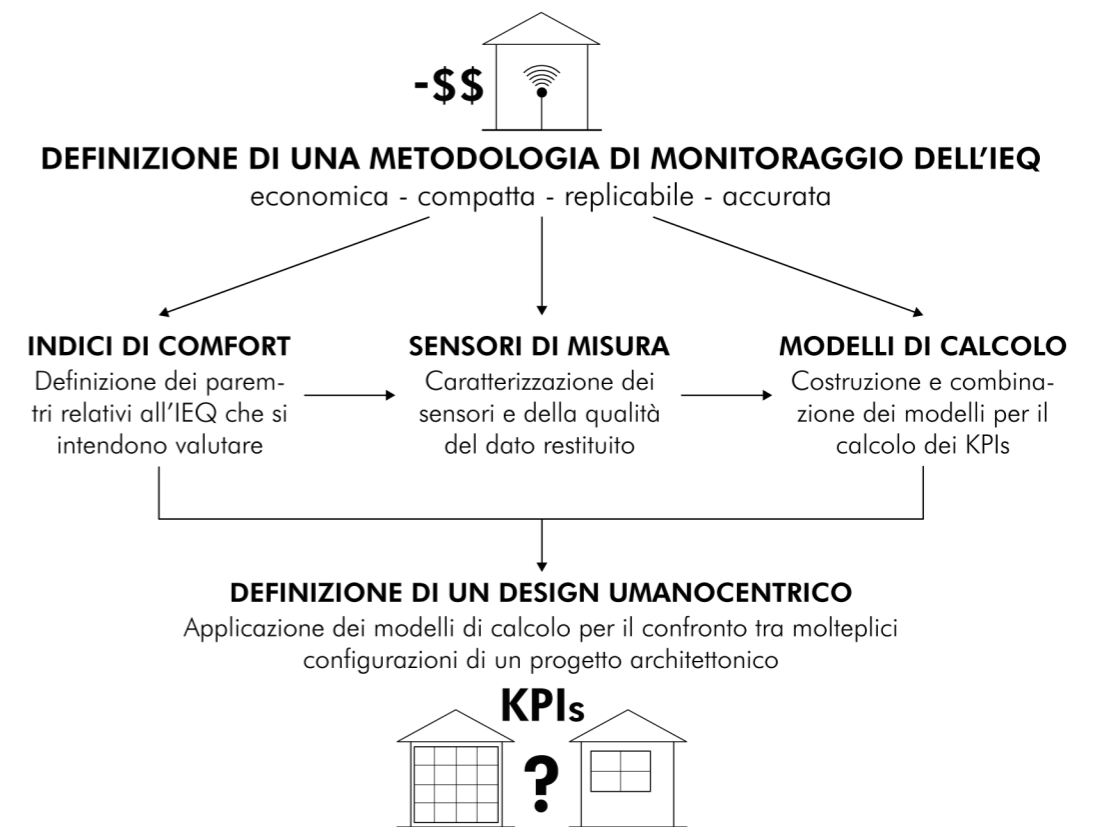


Immagine 04. Schema riassuntivo delle problematiche degli obiettivi e della metodologia del lavoro svolto

Per definire una metodologia di misura dell'IEQ è necessario identificare i parametri da valutare. La qualità ambientale è determinata dai molteplici aspetti che possono influenzare il benessere personale: comfort termico, illuminamento, qualità dell'aria e comfort acustico. Un sistema avanzato potrebbe essere progettato per esaminare i domini di qualità del comfort contemporaneamente o singolarmente, come nel caso che verrà esposto di seguito concentrato sulla valutazione del comfort termico. Definita la componente IEQ da esaminare è possibile individuare attraverso quali indici rappresentativi del soddisfacimento del benessere dell'occupante (KPIs) può essere interpretata. Per calcolare i *Key Performance Indexes* (Cap. 2.2.1.) sono necessarie differenti variabili ambientali da monitorare in continuo, tramite un sistema di acquisizione dati.

Sul mercato sono disponibili molteplici DAQs, che presentano caratteristiche molto diverse tra loro, questo rende ardua l'identificazione di uno strumento che si adatti universalmente a ogni situazione. È possibile caratterizzare la strumentazione di misura attraverso attributi che ne descrivano l'utilizzabilità:

- **Costo:** può variare notevolmente e dipende dal budget disponibile, una strumentazione a basso costo rende la pratica facilmente replicabile;

- **Fasi e modalità di montaggio:** per definire questa caratteristica è necessario conoscere il tipo di ambiente nel quale si intende installare la strumentazione;
- **Modalità di download:** per rendere scorrevole le modalità di analisi è ideale che lo scaricamento dei dati sia automatico o almeno di facile gestione;
- **Componenti:** incidono sull'ingombro della strumentazione, sulle fasi di montaggio ma specialmente sulle variabili misurabili.

Attualmente la quantità e il tipo di sensori installati sono la caratteristica che maggiormente influisce sul costo dello strumento e sulla qualità del dato. I sistemi avanzati *high-cost* combinano numerosi sensori ad alta risoluzione con software di elaborazione dati permettendo una valutazione automatizzata dell'IEQ, mentre gli strumenti *low-cost* si limitano alla misurazione di alcune variabili, attraverso un numero ridotto di sensori, e allo stoccaggio del dato.

Per caratterizzare la qualità ambientale interna usufruendo di un sistema d'acquisizione *low-cost* è necessario implementare la componente d'analisi dei dati, che non può essere fatta direttamente dallo strumento, ma da un *hardware* esterno che a partire dalle variabili misurate arriva alla determinazione dei KPIs. La rielaborazione dei dati può avvenire in diverse modalità definite rispetto al numero di variabili disponibili e al tipo di valutazione a cui si intende giungere. Più il sistema di monitoraggio risulta semplificato e quindi economico maggiore sarà la complessità dei modelli di calcolo applicati. Per poter rispondere alla domanda iniziale, e definire una metodologia di monitoraggio dell'IEQ economica e replicabile, è necessario affiancare ad un sistema di misura *low-cost* un'intricata combinazione di modelli di calcolo, che determini la qualità ambientale interna basandosi su un numero ridotto di variabili (temperatura dell'aria e radiazione solare).

Determinare questa modalità di valutazione dell'IEQ porta a un'altra questione: è possibile applicare una combinazione di modelli di calcolo, basati su poche variabili facilmente ipotizzabili, per modellare un design incentrato sul benessere umano? Per fare ciò è necessario implementare ulteriormente i modelli di calcolo svincolandoli dalle caratteristiche di una configurazione spaziale definita, rendendo possibile il confronto tra diverse ipotesi di progetto. Questo tipo di tecniche (CBDM) sono già ampiamente utilizzate per la definizione di parametri legati all'illuminazione naturale, ma non sono state testate per altre componenti caratterizzanti la qualità ambientale interna, a causa probabilmente della complessità di controllo delle variabili. La definizione di un *human-centric design* non può eludere a considerazioni riguardanti tutti i parametri che influenzano il benessere dell'occupante, per questo è necessario testare delle modalità d'analisi che a partire dalle ipotesi di progetto permettano di valutare l'IEQ nella sua interezza.

### 3.1. Processo sperimentale

Per valutare le differenti tipologie di strumenti di misura introdotti e i modelli di calcolo progettati è stato necessario procedere per step.

**4.** In primo luogo, si è deciso d'installare all'interno del *living-lab* differenti strumenti di misura per definirne caratteristiche e prestazioni: un *Datalogger*, un Multisensore commerciale, una Stazione di Comfort, un *Raspberry*, un sensore termoisolante e dei luxmetri; la scelta è stata dettata dalla disponibilità proposta dall'ufficio tecnico del DENERG.

**5a.** Dopo aver raccolto un sufficiente numero di dati è stato possibile confrontare la risoluzione delle misure effettuate dai diversi sensori, in modo da valutare a priori le modalità di trattamento del valore misurato. Sono state esaminate delle variabili chiave dell'IEQ: la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, l'illuminamento orizzontale e verticale e la concentrazione di CO<sub>2</sub>. La comparazione è riferita a quattro giorni tipo, uno soleggiato e l'altro nuvoloso per entrambe le stagioni di climatizzazione, in modo da esaminare il comportamento dei sensori nei confronti delle dinamiche ambientali. L'obiettivo è duplice, da un lato comprendere qualitativamente l'accuratezza del singolo sensore, dall'altro valutare una possibile calibrazione dei sensori meno accurati.

**5b.** Rispetto al tipo e al numero di variabili che il DAQ è in grado di monitorare, sono necessarie differenti modalità di postproduzione del dato. Lo scopo principale della ricerca è confrontare un sistema *low-cost* e poco intrusivo, che idealmente potrebbe essere replicato in qualsiasi situazione, con un sistema *high-cost*, che presenta un elevato numero di sensori ad alta risoluzione. L'utilizzo di un DAQ a basso costo implica l'introduzione di modelli di calcolo che permettano di quantificare il comfort ambientale con la stessa precisione dei sistemi meno economici, ma autonomi. Per questo si è deciso di costruire svariati modelli per la valutazione della qualità ambientale differenziati dal numero di variabili misurate introdotte rispetto alla strumentazione di riferimento. I modelli di calcolo sono valutati scalarmemente, cioè complessificandoli gradualmente andando man mano a eliminare le variabili misurate, sostituite con nuovi modelli e assunzioni. Questa operazione è risultata necessaria per poter esaminare l'accuratezza del dato

per ognuna delle variabili eliminate. Attraverso la combinazione dei modelli è possibile definire il calcolo degli indici di comfort necessari per la valutazione dell'IEQ.

**5c.** Il calcolo dei KPIs, sul lungo e sul breve termine permette di definire la qualità dello spazio interno. Ai modelli costituiti per il calcolo delle variabili è stata aggiunta un'ulteriore formulazione necessaria per determinare i diversi indici di comfort. Per confrontare il comportamento dei modelli rispetto alle condizioni al contorno sono stati valutati differenti periodi di tempo. Dai risultati ottenuti è possibile appurare la risoluzione dei modelli in relazione a un *Gold standard*, rappresentato dal valore direttamente misurato dallo strumento *high-cost*, così da quantificare in che modalità la semplificazione dell'infrastruttura di rilevamento influisce sulla definizione finale dell'IEQ.

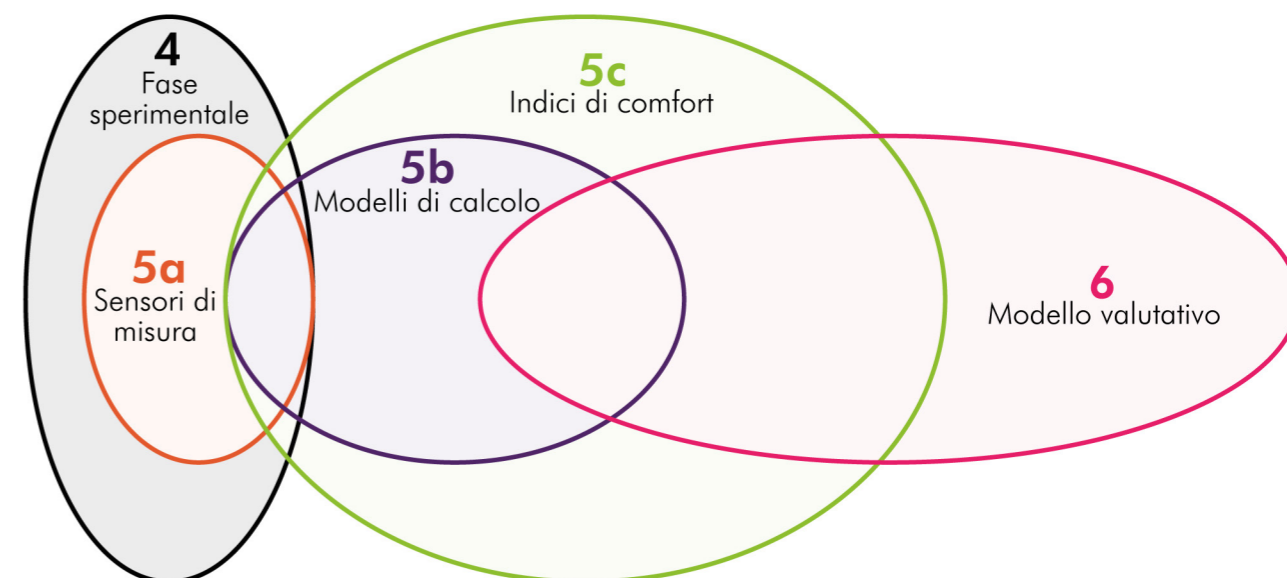


Immagine 05. Schematizzazione degli step del processo sperimentale

**6.** Oltre a caratterizzare la qualità ambientale interna sul breve e sul lungo termine per differenti tipologie di strumenti, la costruzione dei modelli di calcolo ha permesso di dettagliare ulteriormente la valutazione dello spazio costruito; è stato possibile parametrizzare il calcolo delle variabili, svincolandosi dal posizionamento dei sensori e dalle caratteristiche architettoniche definite, in modo da calcolare il livello di comfort rispetto all'area del piano di riferimento. Infine, attraverso la composizione dei modelli di calcolo gli indici sono stati direttamente collegati alle caratteristiche dell'involucro esterno, per poter confrontare tra loro diverse proposte progettuali la cui configurazione differisce per aspetti come l'involucro esterno e le dimensioni dell'ambiente.



## 4. Raccolta dati e fase sperimentale

La sperimentazione sul campo è stata effettuata all'interno di un ufficio del Politecnico di Torino, situato al primo piano della manica del Dipartimento Energia (DENERG). Il progetto è iniziato nel mese di luglio 2023, quando l'ufficio era inutilizzato e presentava diversi arredi, anche ingombrati, che sono stati rimossi o risistemati durante il processo sperimentale, concluso nel gennaio 2024.



Immagine 06. Localizzazione del TEBE L²AB

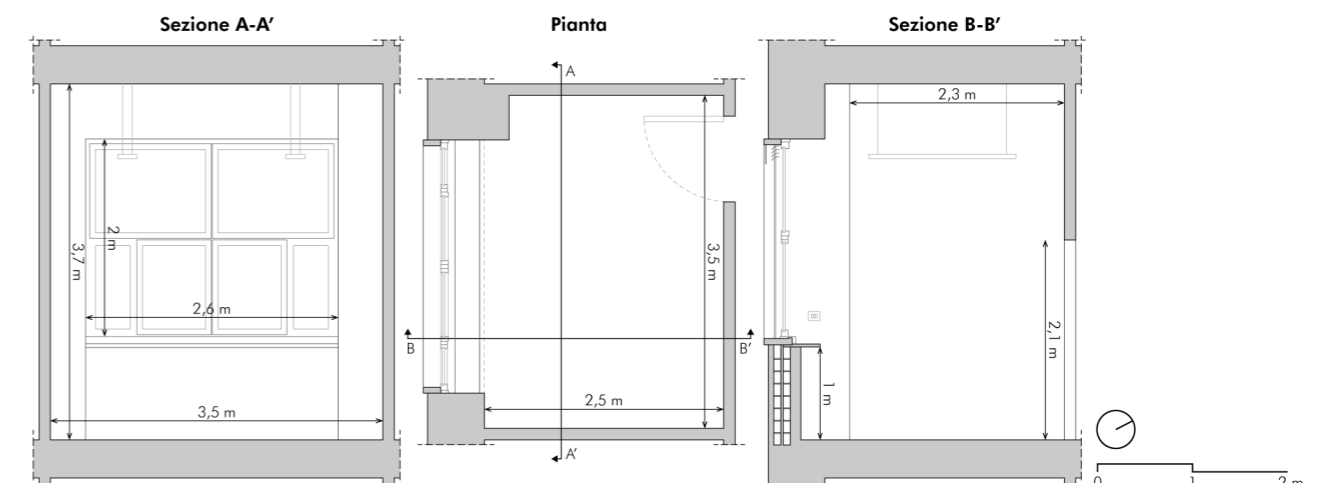


Immagine 07. Disegni tecnici del TEBE L²AB (riferiti ad agosto 2023)

La scelta dell'ufficio è stata dettata dal fatto che già si intendeva usufruirne per un progetto in fase di avvio riguardante l'installazione di una strumentazione di misura permanente per la realizzazione di un *living-lab*, dove poter installare e monitorare prototipi di nuove tecnologie in un ambiente occupato che riproduca delle condizioni il più possibile vicino alla realtà. Si è pensato d'inserirsi in questo progetto con la finalità di avere una valutazione ambientale dell'ufficio prima dell'installazione definitiva della strumentazione.

### 4.1. Fasi della sperimentazione

La sperimentazione è stata parte fondamentale del processo di apprendimento e d'impostazione del progetto di tesi, per questo non ha seguito uno sviluppo definito in partenza ma è stata frutto di modificazioni continue.

La prima fase può essere identificata come un momento conoscitivo necessario per individuare e comprendere le diverse tipologie di strumenti. Per circa un mese, sono stati man mano montati gli strumenti di misura, studiandone il funzionamento e controllando la qualità e la codifica dei dati. È risultata fondamentale la scelta del posizionamento dei sensori, che per quanto possibile è stata lasciata invariata per tutto il proseguimento delle analisi; ad esempio, questo processo è stato particolarmente complicato per le termocoppie, poiché non avendone di nuove a

disposizione ci si è dovuti arrangiare con quelle presenti scendendo a compromessi, che però non hanno influito sui risultati finali. In questa fase si è ritenuto necessario anche confrontare tra loro due diverse Stazioni di Comfort che presentavano gli stessi sensori, ma essendo modelli diversi si intendeva capire quale fosse la più performante, in fine si è optato per quella di ultima generazione (TESTO400).

Successivamente, avendo posizionato e avviato tutti gli strumenti sono stati raccolti i dati, per circa un altro mese durante il quale nessun occupante ha disturbato l'ambiente. Purtroppo, a causa del malfunzionamento di alcuni sensori non è stato possibile ricavare più di una settimana di misure complete da parte di tutti i DAQs per la stagione di raffrescamento; sono state infine identificati cinque giorni nel mese di agosto 2023, che nei capitoli successivi saranno oggetto d'analisi.

Nei mesi di settembre e novembre 2023 la raccolta dei dati è stata interrotta poiché era necessario montare l'attrezzatura dedicata al progetto per il quale l'ufficio era designato in precedenza. Si è comunque ritenuto necessario collaborare anche in questa fase per conoscere la futura tecnologia oggetto d'analisi da parte di questo lavoro.

In fine, una volta conclusa la fase di cantiere è stato possibile riposizionare gli strumenti di misura e, usufruendo in parte anche della nuova strumentazione disponibile, sono stati raccolti i dati riferiti alla stagione invernale. Quest'ultima fase, in cui i dati riguardano la nuova tecnologia d'involucro, si è conclusa nelle prime settimane del 2024.

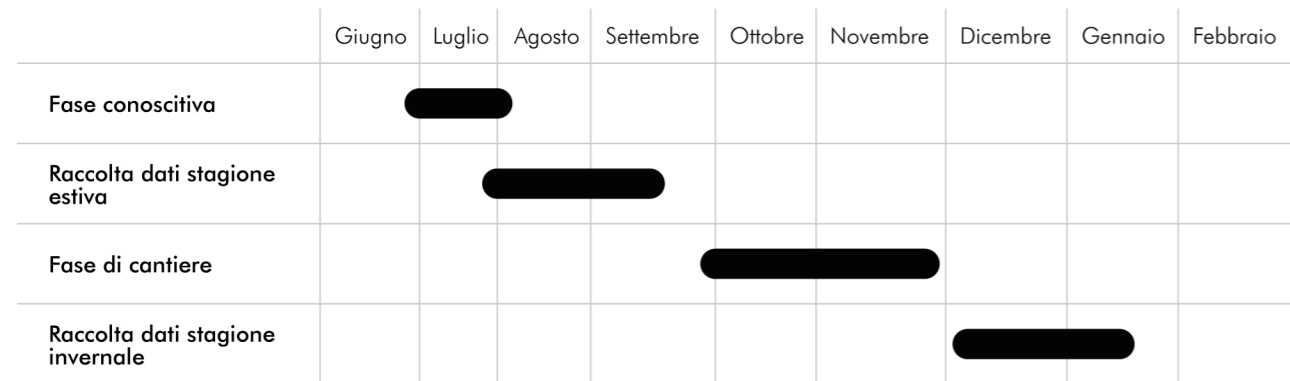


Immagine 08. Cronoprogramma della fase sperimentale

La nuova tecnologia di facciata (TC1), installata nel mese di novembre, consiste in una finestra con funzioni di supporto alla ventilazione, alla gestione termica e al mantenimento della qualità dell'aria interna. La componente trasparente presenta un triplo vetro; la camera d'aria interna è riempita di Argon per fornire isolamento termico, mentre quella esterna è ventilata. La ventilazione forzata avviene attraverso l'ingresso inferiore della cavità ventilata che dirige l'aria verticalmente tra le due lastre di vetro per riscaldarla grazie all'integrazione dello strato assorbente nel vicino infrarosso, posto sul vetro centrale. Per permettere l'inserimento della componente all'interno dell'apertura esistente sono stati predisposti lateralmente due blocchi in calcestruzzo alleggerito. Grazie all'installazione della nuova facciata è stato possibile valutare l'ambiente rispetto a due differenti configurazioni dell'ambiente, così da valutare anche il funzionamento dei modelli di calcolo in situazioni differenti.

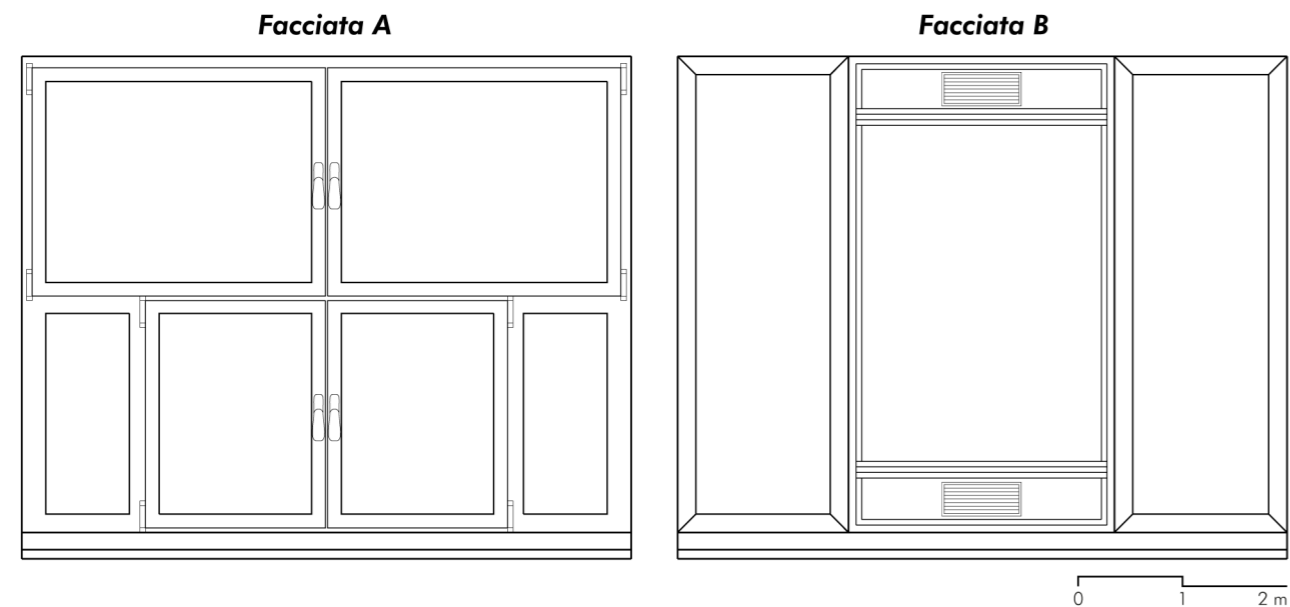


Immagine 09. Prospetto esterno delle due tecnologie di facciata

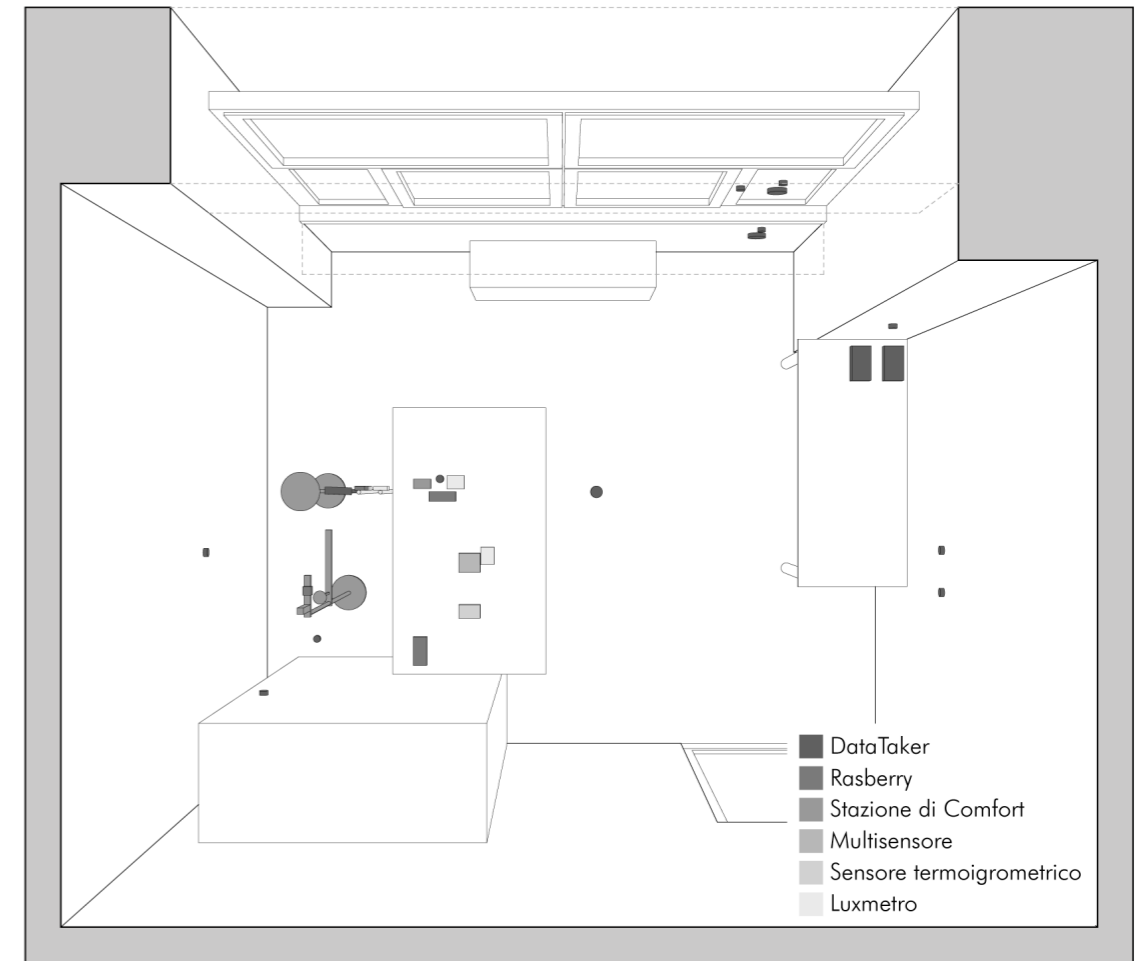


Immagine 10. Posizionamento della strumentazione per la raccolta dati nella stagione estiva

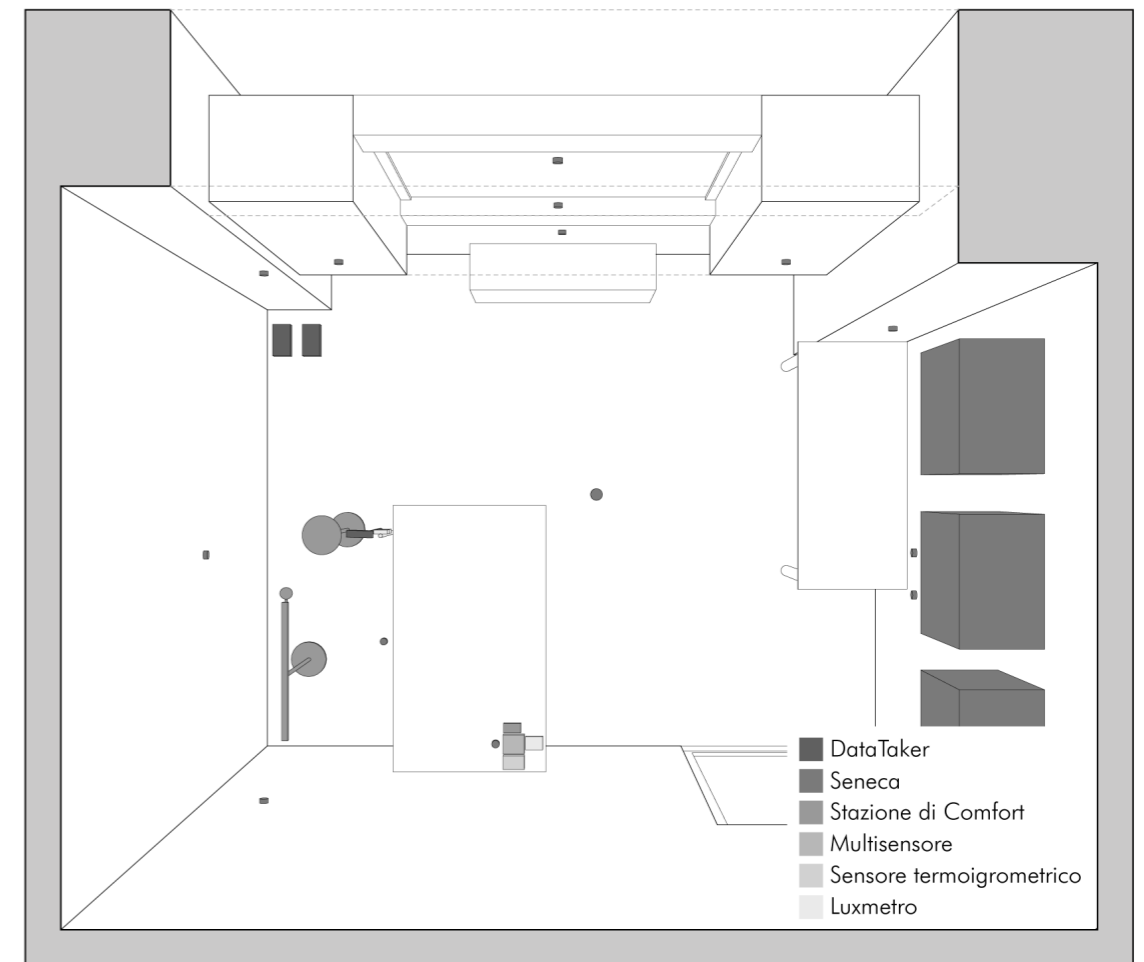


Immagine 11. Posizionamento della strumentazione per la raccolta dati nella stagione invernale

## 4.2. Strumenti di misura installati

Il primo problema affrontato dal progetto di tesi è il confronto di diverse tipologie di strumenti di misura, per questo sono stati individuati tutti gli strumenti resi disponibili dal dipartimento e sono state scelte le tipologie che presentavano caratteristiche differenti ma confrontabili tra loro, in modo da poterne valutare più aspetti possibile.

**Datalogger:** per questa sperimentazione è stato utilizzato un DataTaker DT600 che essendo di vecchia generazione non ha permesso l'installazione di sensori ad alto voltaggio (es: sensore di CO<sub>2</sub>). Il Datalogger è stato utilizzato principalmente per misurare le temperature superficiali e dell'aria interna, attraverso delle termocoppie appositamente calibrate, e la radiazione solare, grazie l'installazione di un radiometro netto posizionato lateralmente al presunto occupante.

**Raspberry:** per monitorare l'ufficio ci si è serviti di un Raspberry con sensori già utilizzati in altre sperimentazioni; quindi, è stato necessario solo montare il circuito di collegamento prima di posizionarli. Per quanto riguarda la programmazione, per questo come per altri aspetti cruciali del lavoro di tesi, è stato di fondamentale il supporto della Dottoranda Manuela Baracani.

**Stazione di Comfort:** per questo studio si è optato per una Stazione di Comfort TESTO400 completa di tutti i sensori. Fondamentale per le considerazioni di questa ricerca è stata la possibilità di collegare un globotermometro, che ha misurato la temperatura radiante nella posizione dell'occupante permettendo il confronto con la temperatura media radiante calcolata con l'ausilio delle misure effettuate dagli altri sensori.

**Multisensore Aircare:** il Multisensore utilizzato è stato posizionato sul piano di lavoro (scrivania) ed è stato collegato alla corrente elettrica per consentire un funzionamento continuo.

**Sensore termoigrometrico:** è programmato per misurare la temperatura ambiente e l'umidità relativa.

**Luxmetro:** i luxmetri utilizzati per la sperimentazione sono della serie X-2000 della Gigahertz-Optik, si tratta di sensori compatti e molto leggeri con un basso consumo energetico e un'ampia memoria.



Immagine 12. Facciata A



Immagine 13. Facciata B



Immagine 14. Stazioni di Comfort

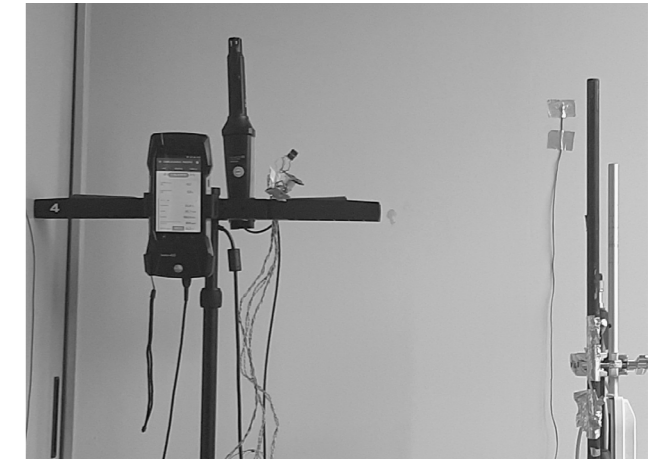


Immagine 15. Stazione di Comfort TESTO400



Immagine 16. Programmazione Datalogger



Immagine 17. DataTaker DT600

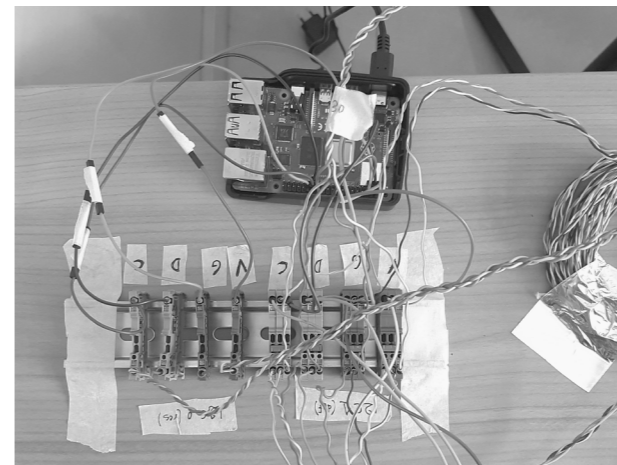


Immagine 18. Raspberry Pi



Immagine 19. Multisensore Aircare



Immagine 20. Sensore termoigrometrico TESTO175



Immagine 21. Luxmetro X-2000

### 4.3. Esiti della valutazione degli strumenti di misura

La sperimentazione diretta sui sistemi di misura descritti in questo capitolo ha permesso di comprendere approfonditamente le differenze nel funzionamento e nella fruizione di ognuno di loro. Altri studi hanno sperimentato anche infrastrutture di misura più avanzate (es: SAMBA) per le quali però esistono molteplici problematiche legate alla loro complessità, ma l'obiettivo di questa ricerca è quello di portare ai minimi termini la sensoristica necessaria, quindi, sarebbe stato superfluo provare a confrontare strumenti così avanzati, che sicuramente permettono una valutazione dell'IEQ più accurata ma non sono ancora adatti a essere replicati nella vita reale. Tra le caratteristiche più influenti per l'utilizzo comune di uno strumento di misura sono da evidenziare il costo e le fasi e modalità di montaggio. Il primo è forse il più importante, poiché facendo riferimento ad ambienti lavorativi, come l'ufficio oggetto d'analisi, in cui sarebbe necessario replicare su vasta scala l'infrastruttura designata non è realistico immaginare di poter sostenere costi così elevati come quelli per un *Datalogger*, ma anche i sistemi più economici come il Multisensore inciderebbero notevolmente sul bilancio di un'azienda; per questo l'ideale sarebbe avere la necessità di misurare solo poche variabili per poter arrivare alla stessa valutazione possibile grazie a questi strumenti avanzati. Anche la modalità di montaggio vista in ottica di un'installazione a grande scala diventa una caratteristica molto influente, perché un montaggio veloce garantisce sul lungo termine una manutenzione semplificata e quindi più economica. Un altro fattore che è stato possibile costatare direttamente è l'importanza dell'intrusività dei DAQs, anche l'installazione di sensori relativamente di piccole dimensioni come le termocoppie può impattare notevolmente sulla percezione dell'ambiente lavorativo, se in gran numero, ma anche la presenza di un luxmetro o di un Multisensore sul piano di lavoro possono intralciare l'autonomia dell'occupante. Queste considerazioni confermano come sia necessario definire un'infrastruttura di misurazione semplificata, per fare ciò però è essenziale considerare gli impatti che questa semplificazione ha sul dato misurato.

Classificazione	ACCURACY HIGH-COST DAQ	LOW-COST DAQ	STAZIONE DI COMFORT	MULTISENSORE	SENSORI SINGOLI	
<b>NOME</b>	Datalogger DT600	Raspberry	Stazione di Comfort TESTO400	Multisensore Aircare	Termoigrometrico TESTO175	Luxmeter X-2000
<b>COSTO</b>	10.830,00 €	300,00 €	4.120,00 €	3.700,00 €	250,00 €	100,00 €
<b>COMPONENTI</b>	DataTaker 600	Raspberry Pi	TESTO400	Alimentatore	Sensori	Sensore
	Modulo dispansione	Alimentatore	Alimentatore	Sensori		
	Termocoppie	Tastiera, schermo, ecc.	Datalogger			
	Termoflussimetri	Sensori	Treppiede			
	Luxmetro		Sensori			
Radionetro netto						
<b>FASI DI MONTAGGIO</b>	Calibrazione delle termocoppie	Programmazione	Montaggio del treppiede	Settaggio delle modalità di misura	Settaggio delle modalità di misura	Settaggio delle modalità di misura
	Programmazione	Composizione del circuito	Posizionamento dei sensori			
	Posizionamento delle termocoppie	Posizionamento dei sensori	Settaggio delle modalità di misura			
	Posizionamento delle termoflussimetri					
	Montaggio del radionetro netto					
<b>MODALITÀ DI DOWNLOAD</b>	Adattatore e software	Connessione Wi-Fi	Bluetooth	Cloud	Adattatore e software	Adattatore e software
		Pennetta USB				
	Temperatura superficiale					
	Temperatura dell'aria	Temperatura dell'aria	Temperatura dell'aria	Temperatura dell'aria	Temperatura dell'aria	Temperatura dell'aria
	Radiazione solare (short/long wave)		Temperatura radiante			
<b>VARIABILI MISURATE</b>		Umidità relativa	Umidità relativa	Umidità relativa	Umidità relativa	
		Concentrazione di CO <sub>2</sub>	Concentrazione di CO <sub>2</sub>	Concentrazione di CO <sub>2</sub>	Concentrazione di CO <sub>2</sub>	
	Flusso termico		Velocità dell'aria			
	Illuminamento orizzontale	Illuminamento orizzontale	Illuminamento orizzontale	Illuminamento orizzontale	Illuminamento orizzontale	Illuminamento orizzontale
		Illuminamento verticale				Illuminamento verticale
			PMV			
			PPD			

Tabella 10. Caratteristiche della strumentazione di misura

## 5a. Sensori di misura

La prima sezione riguarda l'analisi delle misure effettuate dai singoli sensori. Per avere un riscontro che permetta di valutare quale tipologia di sensore sia il più adatto rispetto allo studio che si intende fare, è necessario comprendere qual è l'accuratezza della singola misura. Questo, unito alle caratteristiche precedentemente analizzate (Tabella 10), può semplificare il processo decisionale per futuri lavori di ricerca.

Sono state prese in considerazione un certo numero di variabili legate al comfort termico, al comfort luminoso e alla qualità dell'aria. Ogni variabile verrà analizzata per quattro giorni tipo:

- Stagione estiva, giorno soleggiato => 9 agosto 2023
- Stagione estiva, giorno nuvoloso => 12 agosto 2023
- Stagione invernale, giorno soleggiato => 11 dicembre 2023
- Stagione invernale, giorno nuvoloso => 9 dicembre 2023

I dati relativi alle condizioni esterne sono stati verificati attraverso la cronologia, disponibile online, di 3B Meteo.

INDICI DI COMFORT	VARIABILI MISURATE	STRUMENTAZIONE
<b>COMFORT TERMICO</b>		
Temperatura operativa ( $T_{op}$ ) Voto medio previsto (PMV) Percentuale di insoddisfatti (PPD)	Temperatura dell'aria ( $T_a$ )	Stazione di Comfort Datalogger Aircare Termoigrometrico Raspberry
	Temperatura radiante ( $T_r$ )	Stazione di Comfort
	Temperatura superficiale ( $T_s$ )	Datalogger Raspberry
	Umidità relativa (RH)	Stazione di Comfort Datalogger Aircare Termoigrometrico Raspberry
	Velocità dell'aria ( $V_a$ )	Stazione di Comfort Datalogger Raspberry
	Radiazione solare ( $R_{sol}$ )	Datalogger
	Illuminamento verticale ( $E_v$ )	Raspberry Luxmetro
<b>COMFORT LUMINOSO</b>		
Fattore di luce diurna (FLD) Probabilità di abbagliamento (DGPs)	Illuminamento orizzontale ( $E_h$ )	Stazione di Comfort Datalogger Aircare Raspberry Luxmetro
	Illuminamento verticale ( $E_v$ )	Raspberry Luxmetro
<b>QUALITÀ DELL'ARIA</b>		
Qualità dell'aria interna (IAQI) Qualità dell'aria per la salute (IHQI)	Concentrazione di $CO_2$	Stazione di Comfort Datalogger Aircare Raspberry
	Concentrazione di TVOC	Aircare
	Concentrazione di polveri sottili PM2.5	Aircare
	Concentrazione di polveri sottili PM10	Aircare

Tabella 11. Variabili e strumenti considerati per la valutazione dell'accuratezza

## 5a.1. Temperatura dell'aria ( $T_a$ )

9 agosto 2023			
$T_a$ (°C)	Max	Min	Media
DT600	31,90	27,50	29,30
RSP	32,52	27,57	29,47
TESTO400	32,70	27,60	29,47
AICARE	32,22	27,80	29,50
TESTO175	31,50	26,90	28,61
$\Delta$	1,20	0,90	0,89

Tabella 12. Valori di  $T_a$  per la stagione estiva nel giorno soleggiato

12 agosto 2023			
$T_a$ (°C)	Max	Min	Media
DT600	32,20	29,20	30,32
RSP	32,96	29,35	30,46
TESTO400	33,20	29,40	30,49
AICARE	32,68	29,50	30,61
TESTO175	32,00	28,60	29,71
$\Delta$	1,20	0,90	0,89

Tabella 13. Valori di  $T_a$  per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

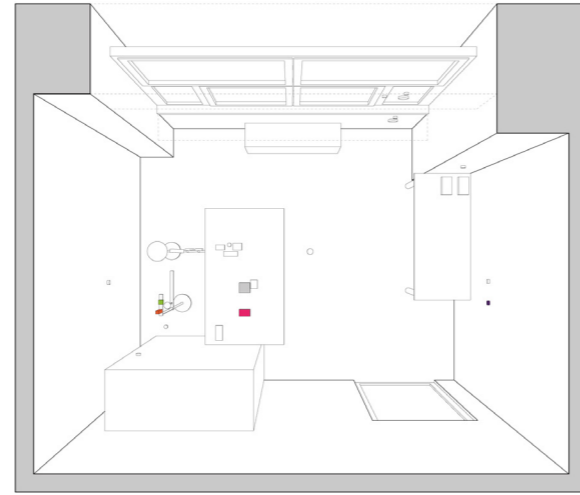


Immagine 22. Navigatore ( $T_a$ ) stagione estiva

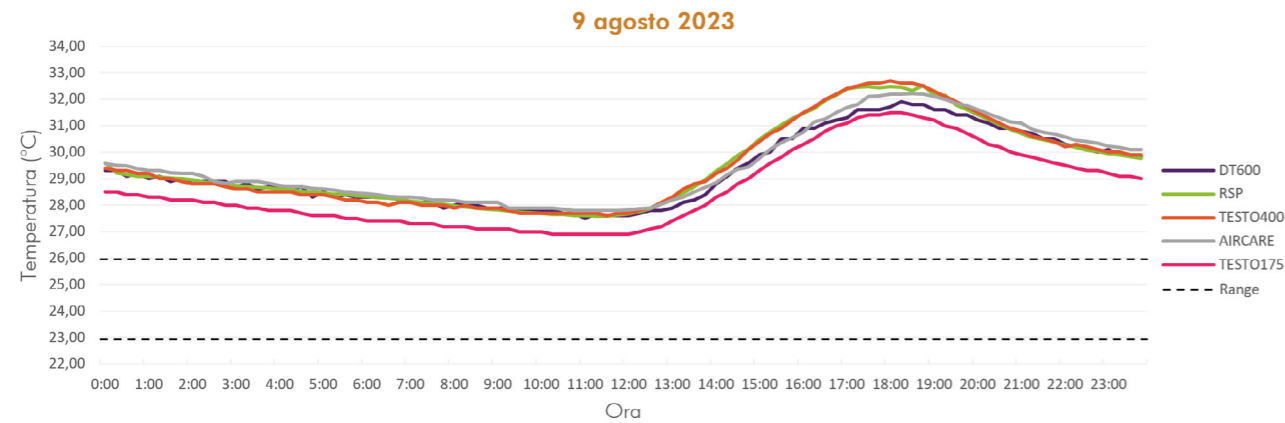


Grafico 02. Temperatura dell'aria per la stagione estiva nel giorno soleggiato

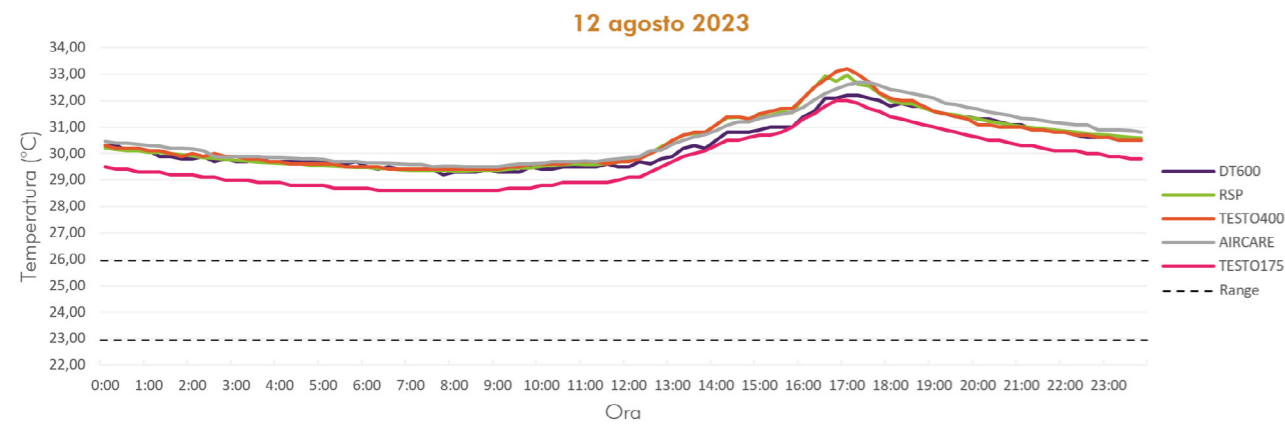


Grafico 03. Temperatura dell'aria per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

La temperatura dell'aria è stata valutata rispetto a tutti i sensori forniti nella fase sperimentale, a meno ovviamente del luxmetro, e del Raspberry e il Datalegger nella stagione invernale poiché non è stato possibile rimontarli, dopo la messa in opera della nuova facciata, ma sono stati sostituiti con la nuova strumentazione basata su Seneca.

La temperatura dell'aria misura esclusivamente la temperatura dell'aria che circonda il sensore, per questo motivo è particolarmente condizionata dal suo posizionamento; perciò  $T_a$ , da sola, non può essere utilizzata per valutare la qualità ambientale interna, ma esistono comunque dei range consigliati. Secondo l'ASHRAE per ambienti adibiti a uffici è consigliabile avere una temperatura compresa:

23°C-26°C => stagione estiva

20°C-22°C => stagione invernale.

11 dicembre 2023			
$T_a$ (°C)	Max	Min	Media
SENECA	20,68	16,30	18,68
TESTO400	21,50	17,40	19,57
AICARE	23,23	18,10	20,18
TESTO175	22,40	17,20	19,23
$\Delta$	0,83	0,90	0,95

Tabella 14. Valori di  $T_a$  per la stagione invernale nel giorno soleggiato

9 dicembre 2023			
$T_a$ (°C)	Max	Min	Media
SENECA	19,12	16,90	17,88
TESTO400	20,00	18,10	18,97
AICARE	20,30	18,90	19,55
TESTO175	19,40	17,90	18,57
$\Delta$	0,90	1,00	0,98

Tabella 15. Valori di  $T_a$  per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

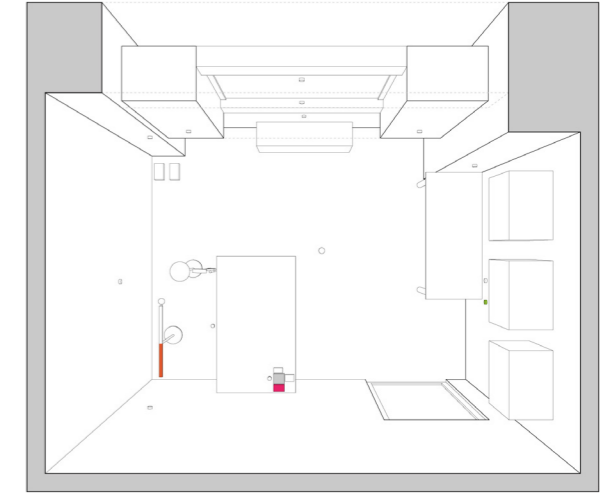


Immagine 23. Navigatore ( $T_a$ ) stagione invernale

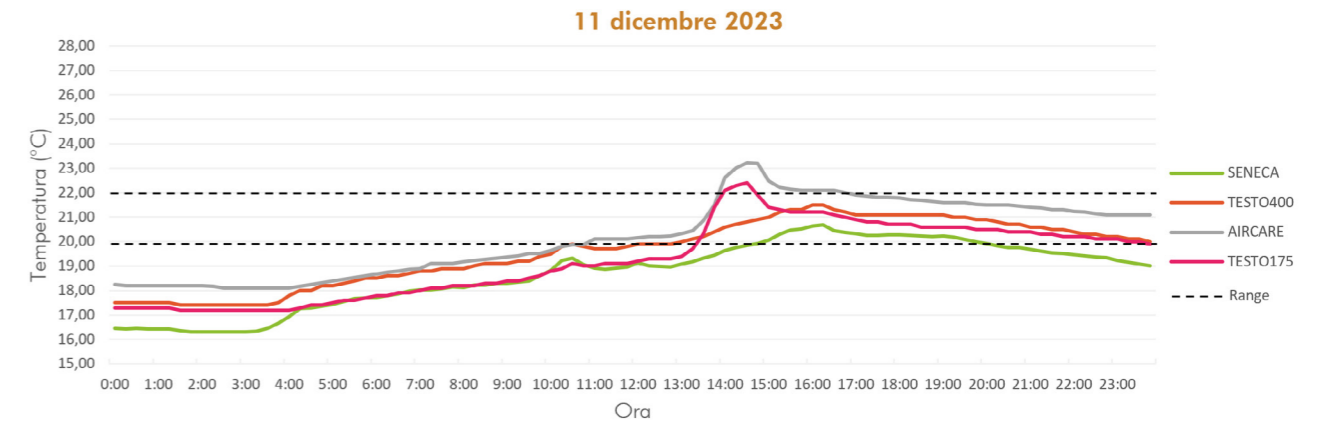


Grafico 04. Temperatura dell'aria per la stagione invernale nel giorno soleggiato

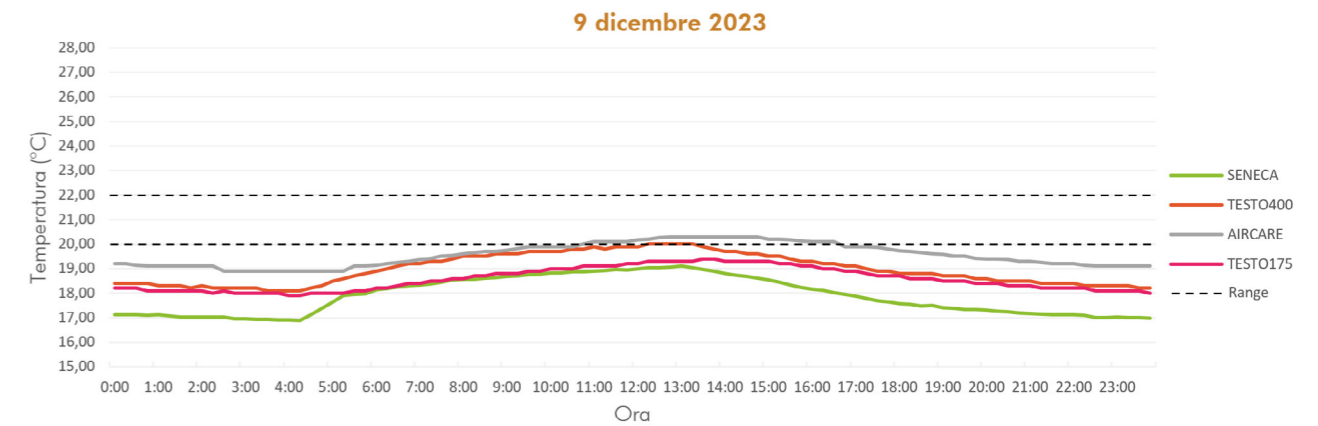


Grafico 05. Temperatura dell'aria per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

Nei giorni analizzati, escluso l'11 dicembre quando l'ambiente era occupato, la temperatura non rientra mai nei range, questo probabilmente perché l'ambiente non presentava occupanti e l'impianto di climatizzazione non era in funzione.

Per quanto riguarda la corrispondenza tra le misure effettuate, nella stagione estiva i sensori presentano prevalentemente lo stesso andamento con Delta costanti causati dalla posizione. Delle differenze più marcate si evidenziano nella stagione invernale dove il sensore termoisolante e il Multisensore hanno un andamento coincidente tra loro ma differente da quello della Stazione di Comfort e di Seneca; anche questa discrepanza è dovuta dalla posizione dei sensori, perché i primi due si trovano molto vicini tra loro e inoltre, quel punto è colpito dalla radiazione solare diretta, che nel giorno 11 dicembre causa un picco di temperatura.

## 5a.2. Umidità relativa (RH)

9 agosto 2023			
RH (%)	Max	Min	Media
RSP	32,54	27,52	29,45
TESTO400	29,60	24,90	26,77
AICARE	30,15	25,83	27,67
TESTO175	33,00	28,40	30,26
Δ	2,94	2,62	2,68

Tabella 16. Valori di RH per la stagione estiva nel giorno soleggiato

12 agosto 2023			
RH (%)	Max	Min	Media
RSP	45,82	40,68	44,13
TESTO400	43,30	37,80	41,28
AICARE	43,10	39,72	41,74
TESTO175	47,30	43,60	45,61
Δ	2,72	2,88	2,85

Tabella 17. Valori di RH per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

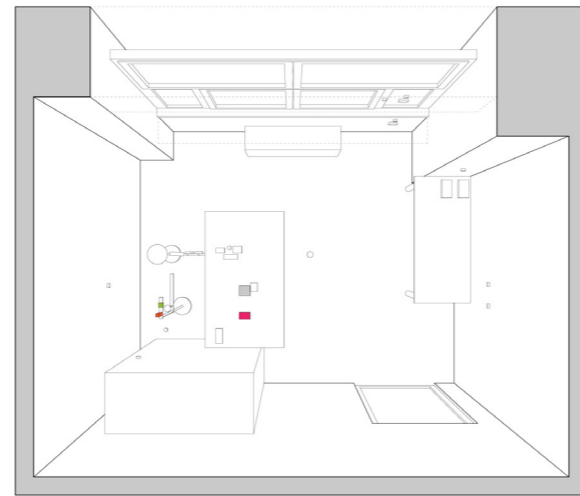


Immagine 24. Navigatore (RH) stagione estiva

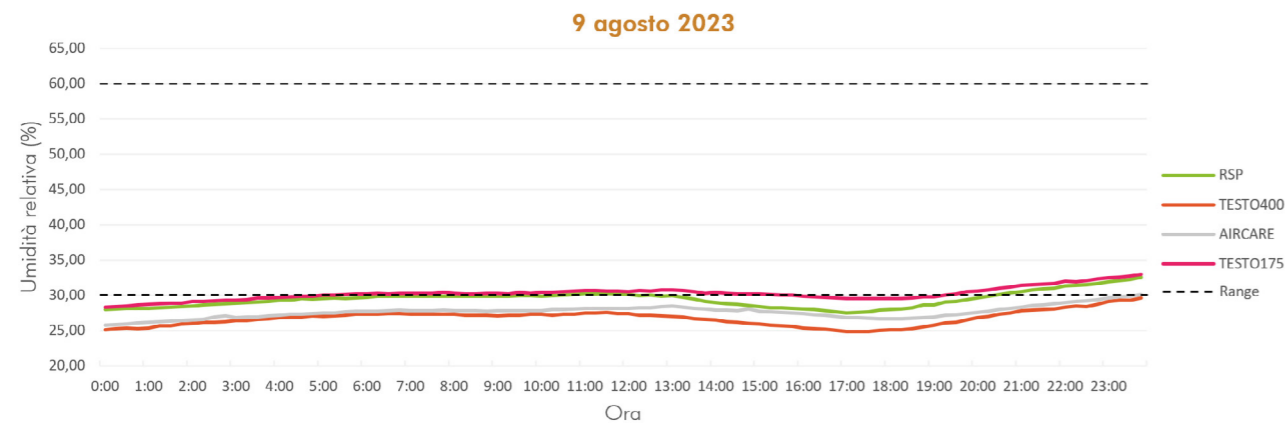


Grafico 06. Umidità relativa per la stagione estiva nel giorno soleggiato

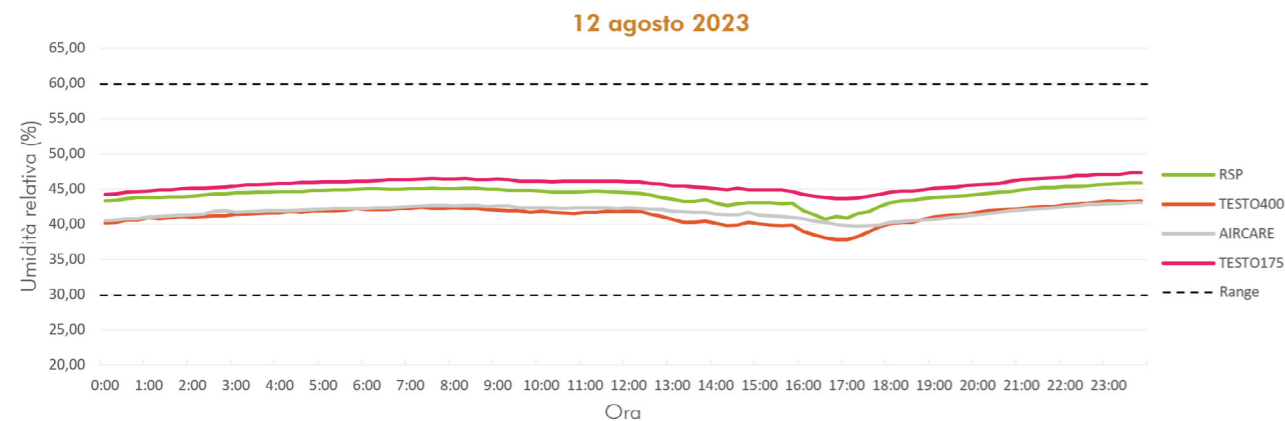


Grafico 07. Umidità relativa per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

L'umidità relativa è stata misurata dagli stessi sensori che hanno raccolto i dati di temperatura dell'aria, escluso il *Datalogger*, perché non era disponibile un sensore adatto.

La misura d'umidità relativa è particolarmente variabile, essendo influenzata da molti fattori come la temperatura dell'aria, la radiazione solare e la ventilazione. Infatti, nei grafici si può notare come i picchi minimi per alcuni sensori si presentano proprio quando questi sono colpiti da radiazione solare diretta, anche se minima.

Garantire una certa umidità relativa è molto importante poiché influenza la percezione della temperatura da parte dell'occupante. Inoltre, un ambiente troppo secco o troppo umido può creare gravi situazioni di discomfort anche rispetto alla qualità dell'aria interna. I livelli d'umidità relativa da rispettare possono variare molto rispetto alla situazione specifica, normalmente si cerca di rispettare un livello di:

11 dicembre 2023			
RH (%)	Max	Min	Media
SENECA	27,89	24,84	25,95
TESTO400	36,60	32,20	33,70
AICARE	35,60	28,80	33,12
TESTO175	37,90	31,70	35,67
Δ	1,00	3,40	0,58

Tabella 18. Valori di RH per la stagione invernale nel giorno soleggiato

9 dicembre 2023			
RH (%)	Max	Min	Media
SENECA	23,81	22,75	23,20
TESTO400	29,80	27,80	28,42
AICARE	29,49	27,60	28,28
TESTO175	31,90	29,70	30,48
Δ	0,31	0,20	0,14

Tabella 19. Valori di RH per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

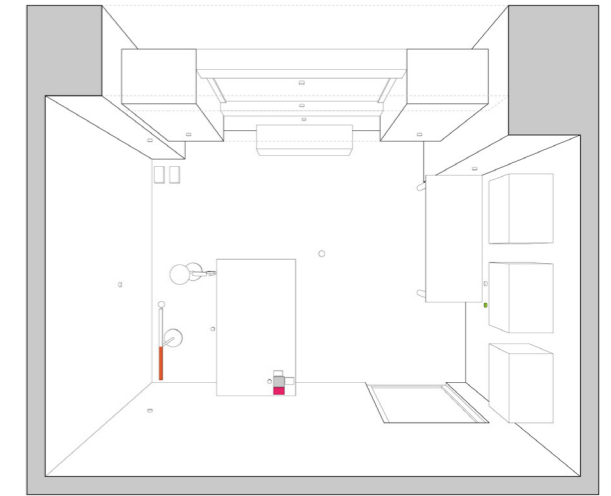


Immagine 25. Navigatore (RH) stagione invernale

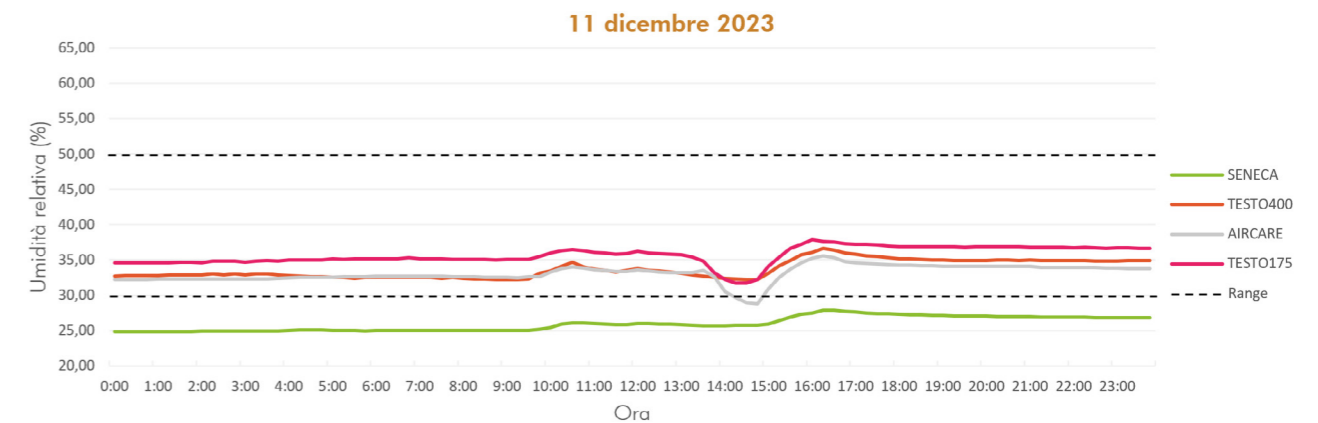


Grafico 08. Umidità relativa per la stagione invernale nel giorno soleggiato

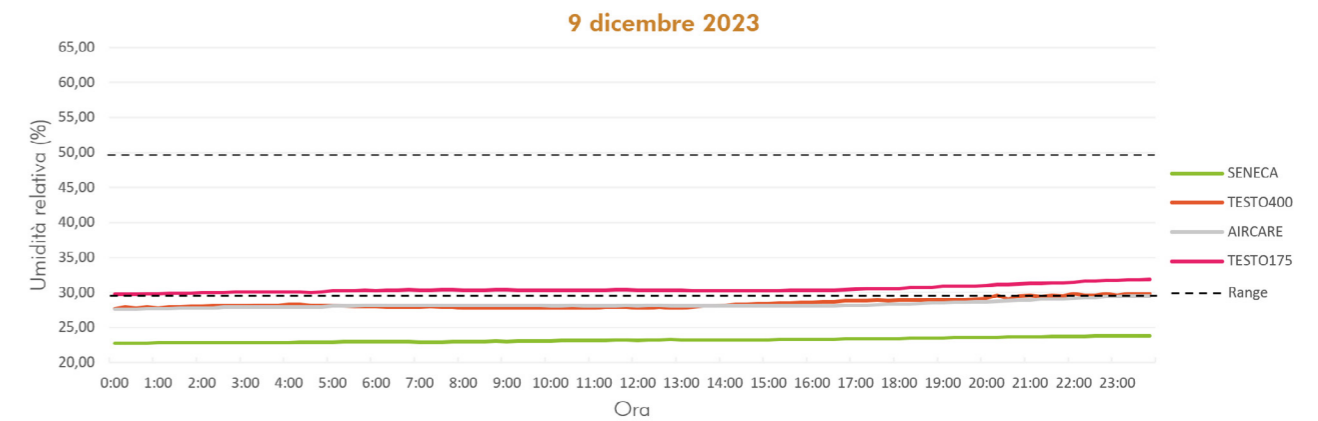


Grafico 09. Umidità relativa per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

30%-60% => stagione estiva

30%-50% => stagione invernale.

Il sensore la cui misura più si distanzia dalle altre è quello della strumentazione Seneca, questo è dovuto sicuramente dalla posizione ma probabilmente anche dalla calibrazione del sensore, che quindi necessita di un aggiornamento, un Delta di circa il 10% può influenzare notevolmente le condizioni di comfort, infatti, a differenza degli altri sensori per la stagione invernale si trova al di fuori del range.

### 5a.3. Illuminamento orizzontale (E<sub>o</sub>)

9 agosto 2023			
E <sub>o</sub> (lux)	Max	Min	Media
DT600	35431,00	-0,21	1977,37
RSP	25333,25	0,00	1198,76
TESTO400	34642,00	0,00	1906,67
X-2000	36512,00	0,28	2010,93
Δ	10097,75	0,00	778,61

Tabella 20. Valori di E<sub>o</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato

12 agosto 2023			
E <sub>o</sub> (lux)	Max	Min	Media
DT600	29406,00	0,00	1621,95
RSP	21119,78	0,00	959,63
TESTO400	27093,00	0,00	1580,36
X-2000	30761,50	0,27	1773,44
Δ	8286,22	0,00	662,32

Tabella 21. Valori di E<sub>o</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso



Immagine 26. Navigatore (E<sub>o</sub>) stagione estiva

11 dicembre 2023			
E <sub>o</sub> (lux)	Max	Min	Media
SENECA	17933,33	0,00	799,79
TESTO400	16052,00	0,20	800,44
X-2000	21678,50	0,61	1040,86
Δ	5626,50	0,61	241,06

Tabella 22. Valori di E<sub>o</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato

9 dicembre 2023			
E <sub>o</sub> (lux)	Max	Min	Media
SENECA	206,67	0,00	30,03
TESTO400	219,90	0,20	25,59
X-2000	183,59	0,61	25,78
Δ	36,31	0,61	4,44

Tabella 23. Valori di E<sub>o</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

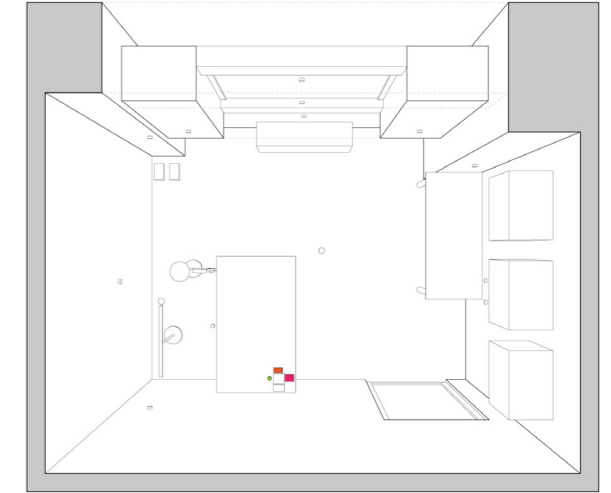


Immagine 27. Navigatore (E<sub>o</sub>) stagione invernale

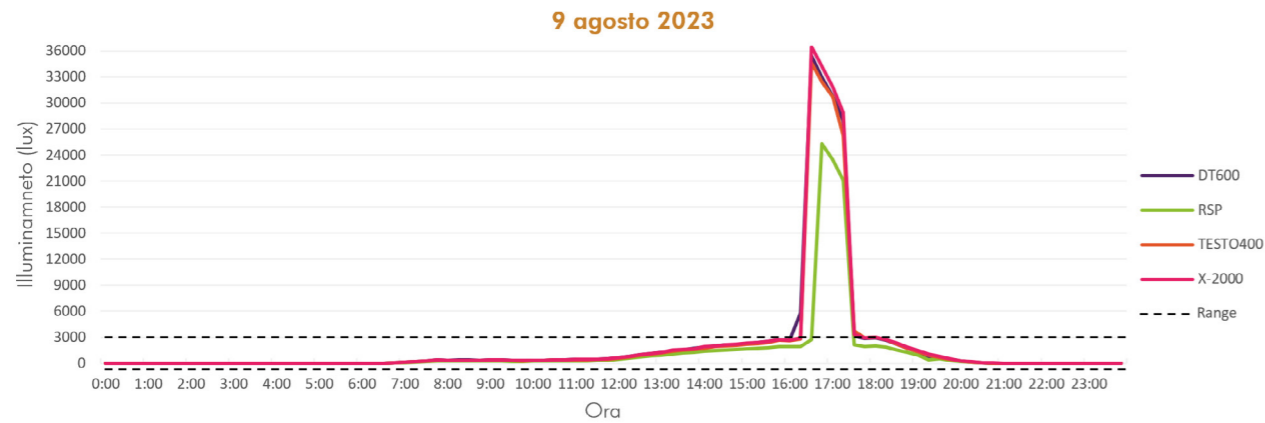


Grafico 10. Illuminamento orizzontale per la stagione estiva nel giorno soleggiato

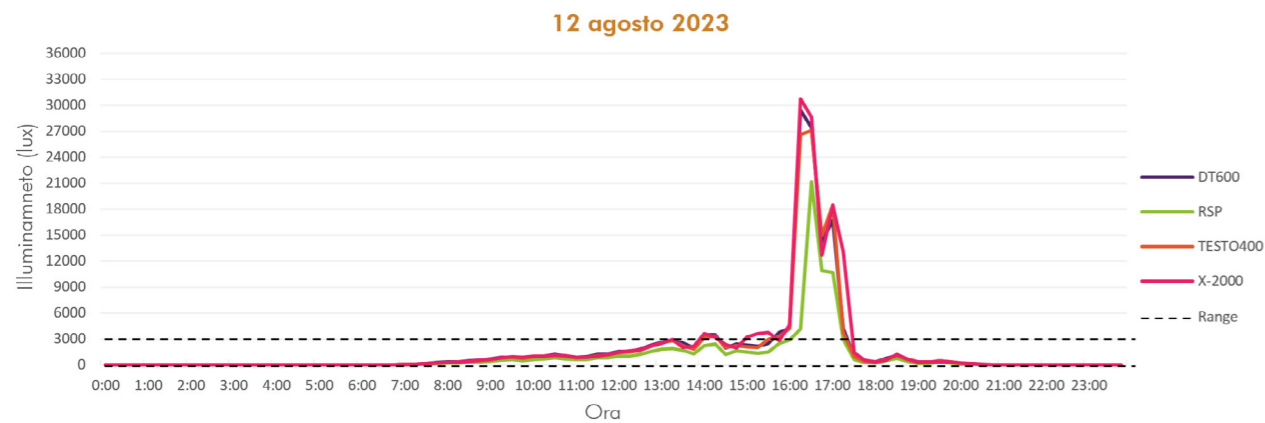


Grafico 11. Illuminamento orizzontale per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

Per quando riguarda l'illuminamento, è importante specificare come le misure siano state particolarmente influenzate dal posizionamento e dal cambio della tecnologia di facciata (Cap. 4.1.1.) che, riducendo notevolmente la superficie vetrata e la trasmissione solare, ha esponenzialmente ridotto il range d'illuminamento misurati.

Un illuminamento orizzontale adeguato nei luoghi di lavoro, come gli uffici, è fondamentale per permettere un adeguato svolgimento del compito da parte dell'occupante oltre a essere importante anche per il corretto funzionamento delle condizioni psicofisiche legate al ritmo circadiano. Il range d'illuminamento visualizzato è quello definito dal UDI (Cap. 2.3.1.) compreso tra i 100 e 3000 lux.

Nella stagione estiva durante le ore d'occupazione gli illuminamenti si trovano sempre all'interno del range tranne che per le ore di picco, quando i sensori sono colpiti dalla radiazione solare diretta e potrebbero presentarsi situazioni di discomfort. Le misure dei sensori mantengono lo stesso andamento, ma il sensore *low-cost* (Raspberry) risulta

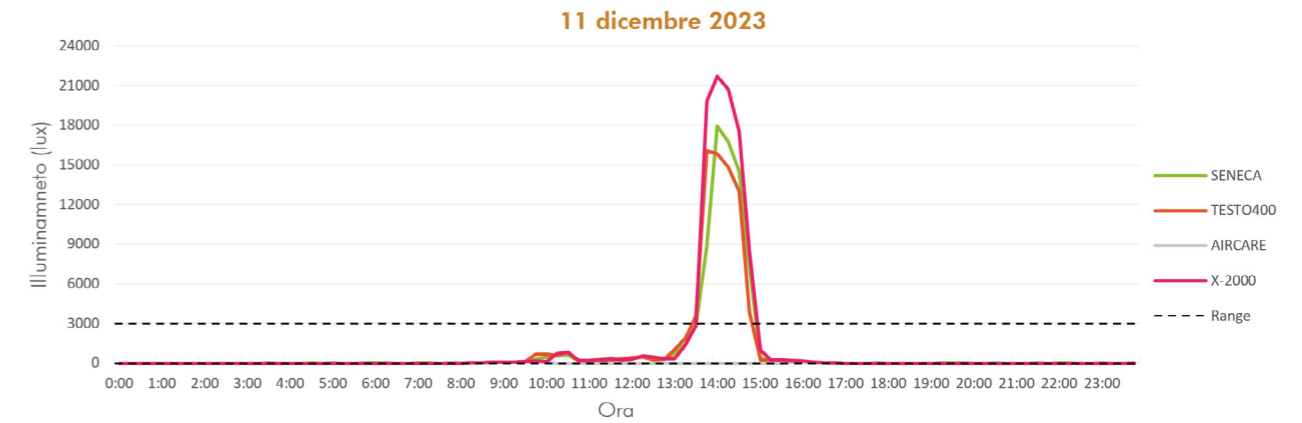


Grafico 12. Illuminamento orizzontale per la stagione invernale nel giorno soleggiato

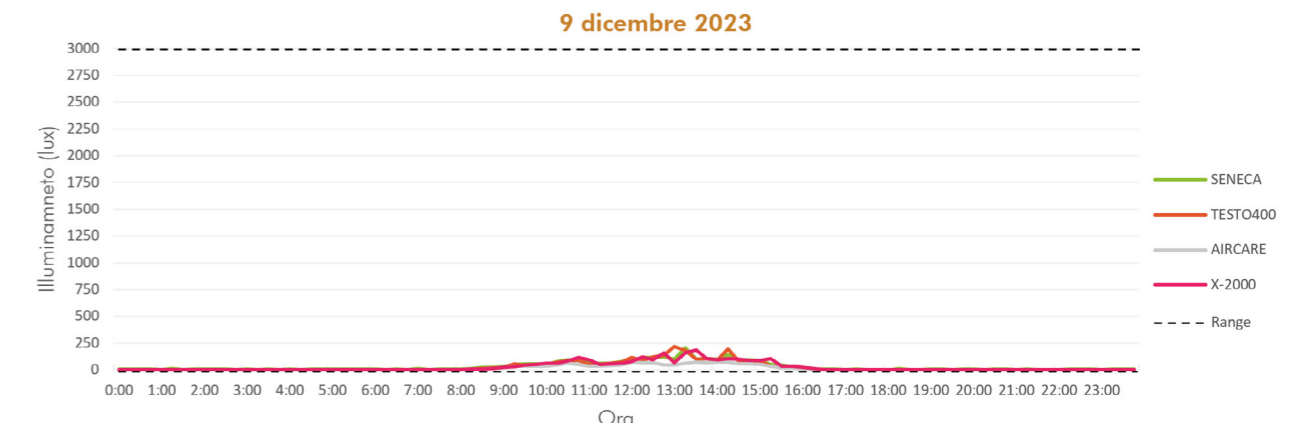


Grafico 13. Illuminamento orizzontale per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

particolarmente distanziato dagli altri, probabilmente perché non riesce a leggere determinati livelli d'illuminamento, ma attraverso una calibrazione questo gap può essere migliorato.

È evidente come la nuova facciata non permetta il raggiungimento delle condizioni di comfort, per i giorni analizzati vengono difficilmente raggiunti i 300 lux, richiesti dalla normativa. Questa situazione cambia solo per il momento di picco nel giorno soleggiato, inesistente in quello nuvoloso, dove però le misure effettuate dai sensori si distanziano leggermente, questo probabilmente è dovuto dalle differenti altezze rispetto al piano orizzontale. Per le misure d'illuminamento il sensore di riferimento è il luxmetro X-2000 che ha un'accuratezza maggiore. Il Multisensore presenta diverse problematiche con la misurazione di questo parametro: nel mese di agosto non è stato possibile ricavare dei dati confrontabili, poiché lo strumento era sprovvisto di un attacco alla corrente elettrica; nel mese di dicembre, nonostante sia stata fornita un'alimentazione continua, sono riscontrabili malfunzionamenti e le misure necessitano comunque di una calibrazione.



## 5a.4. Illuminamento verticale ( $E_v$ )

9 agosto 2023			
$E_v$ (lux)	Max	Min	Media
RSP	24167,75	0,00	1385,29
X-2000	29828,00	0,25	1515,62
$\Delta$	5660,25	0,25	130,33

Tabella 24. Valori di  $E_v$  per la stagione estiva nel giorno soleggiato

12 agosto 2023			
$E_v$ (lux)	Max	Min	Media
RSP	13068,34	0,00	1052,25
X-2000	10277,25	0,25	1283,45
$\Delta$	2791,09	0,25	231,20

Tabella 25. Valori di  $E_v$  per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

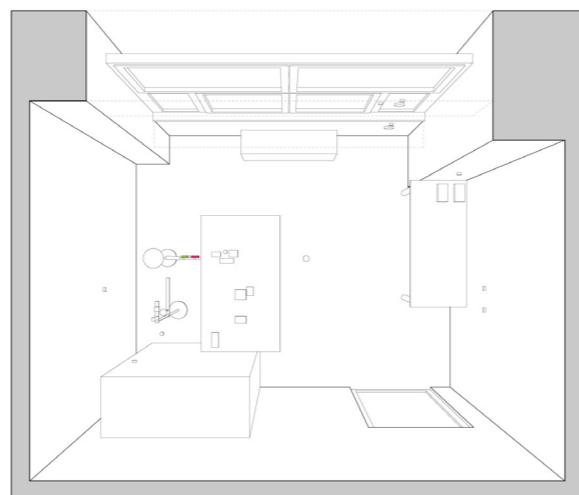


Immagine 28. Navigatore ( $E_v$ ) stagione estiva

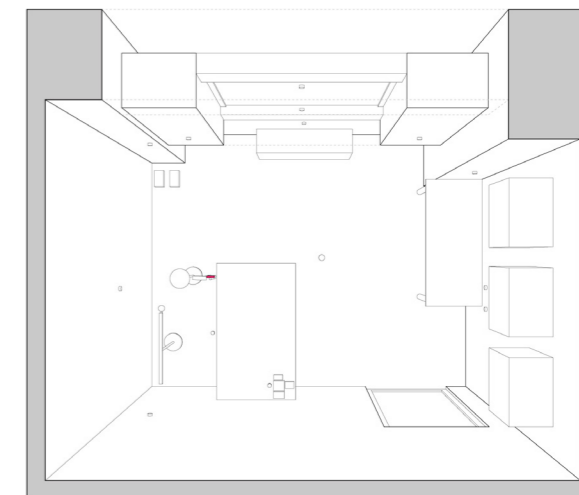


Immagine 29. Navigatore ( $E_v$ ) stagione invernale

11 dicembre 2023			
$E_v$ (lux)	Max	Min	Media
X-2000	1353,69	0,44	154,39

Tabella 26. Valori di  $E_v$  per la stagione invernale nel giorno soleggiato

9 dicembre 2023			
$E_v$ (lux)	Max	Min	Media
X-2000	364,31	0,45	43,10

Tabella 27. Valori di  $E_v$  per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

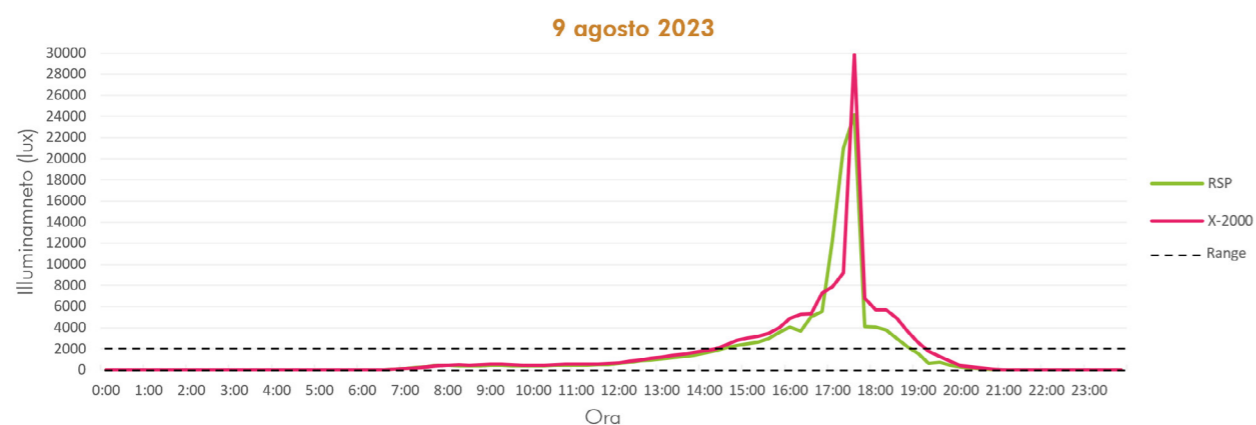


Grafico 14. Illuminamento verticale per la stagione estiva nel giorno soleggiato

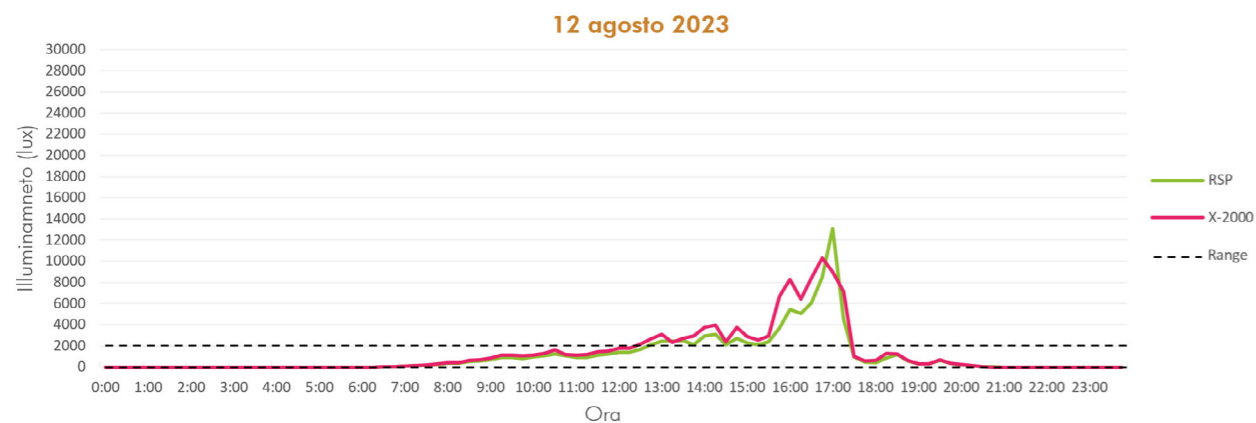


Grafico 15. Illuminamento verticale per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

Per l'illuminamento verticale valgono le stesse considerazioni sulla facciata fatte rispetto all'illuminamento orizzontale; inoltre, nella seconda fase, come detto in precedenza, non è stato possibile montare il Raspberry per questo è presente solo la misura del luxmetro X-2000.

L'illuminamento verticale è importante per garantire un ambiente ben illuminato, e influenza l'esperienza visiva e il comfort degli occupanti. È importante il controllo di questo parametro, soprattutto perché può causare discomfort dovuto all'abbagliamento. Tuttavia, i range specifici d'illuminamento verticale richiesti possono variare in base all'uso dell'ambiente e agli standard di riferimento. Per gli uffici solitamente si cerca di garantire un illuminamento verticale tra il 50% e il 70% dell'illuminamento orizzontale.

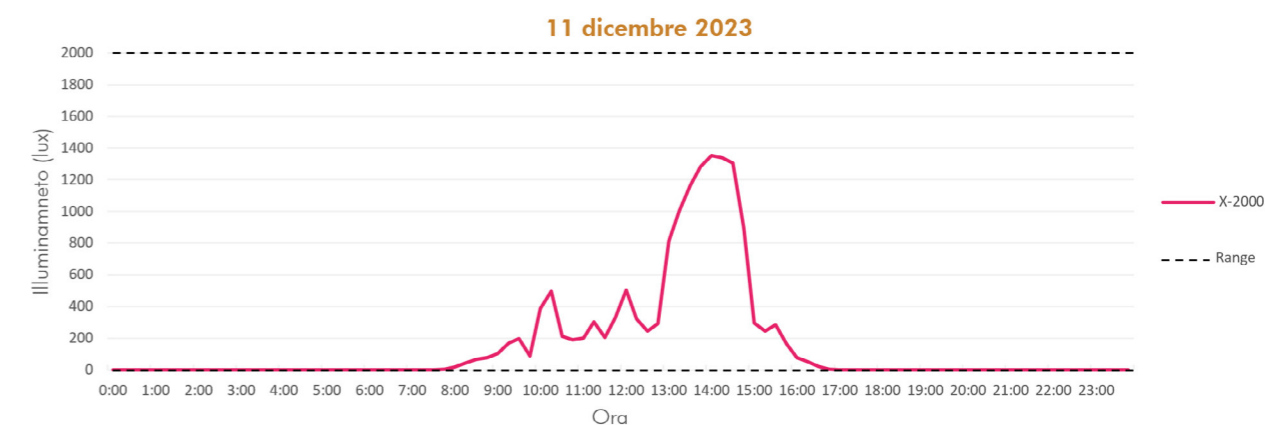


Grafico 16. Illuminamento verticale per la stagione invernale nel giorno soleggiato

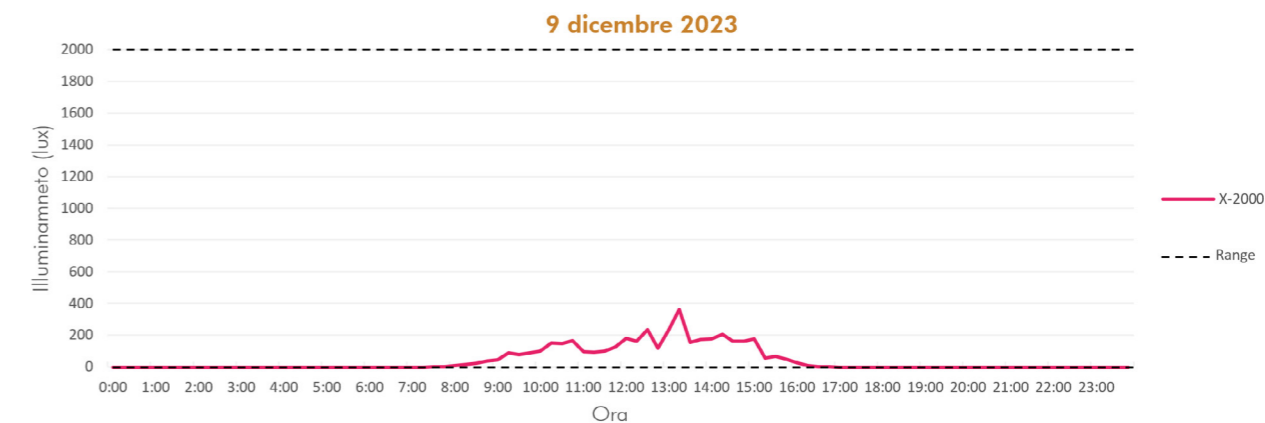


Grafico 17. Illuminamento verticale per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

Il rapporto tra le accuratze delle misure effettuate con il Raspberry e il luxmetro sono in linea con quelle dell'illuminamento orizzontale, tranne per alcuni momenti in cui la misura del Raspberry supera quella del luxmetro a causa probabilmente dell'interazione con la luce solare diretta.

## 5a.5. Concentrazione di CO<sub>2</sub>

9 agosto 2023			
CO <sub>2</sub> (ppm)	Max	Min	Media
RSP	778,95	702,45	732,47
TESTO400	452,00	401,00	417,70
Δ	326,95	301,45	314,77

Tabella 28. Valori di CO<sub>2</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato

12 agosto 2023			
CO <sub>2</sub> (ppm)	Max	Min	Media
RSP	743,38	699,13	721,63
TESTO400	437,00	401,00	414,72
Δ	306,38	298,13	306,91

Tabella 29. Valori di CO<sub>2</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

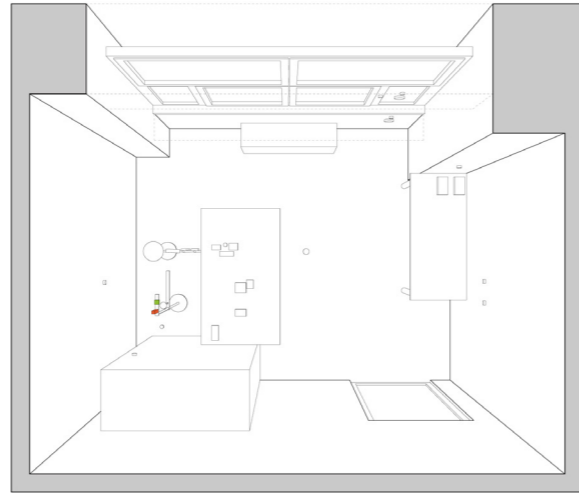


Immagine 30. Navigatore (CO<sub>2</sub>) stagione estiva

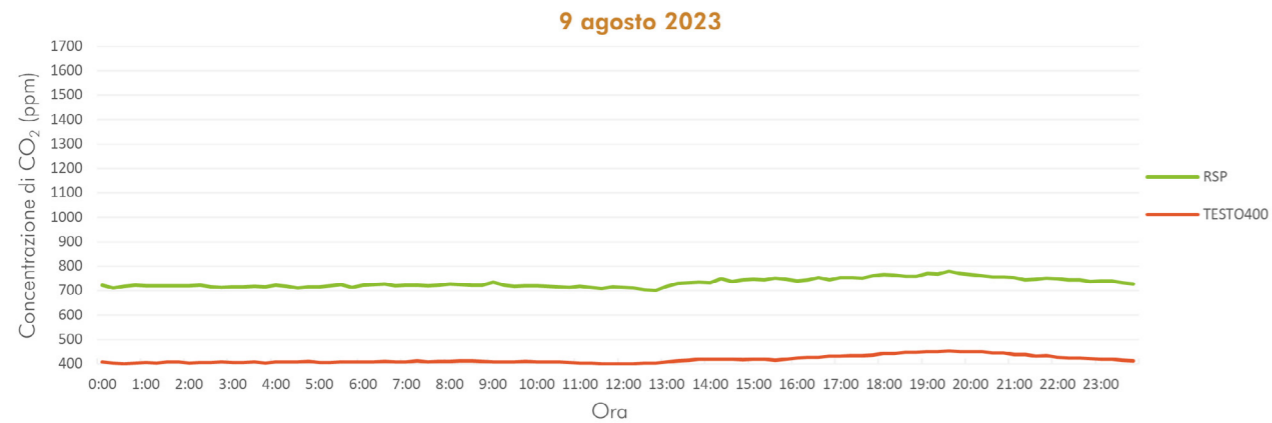


Grafico 18. Concentrazione di CO<sub>2</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato

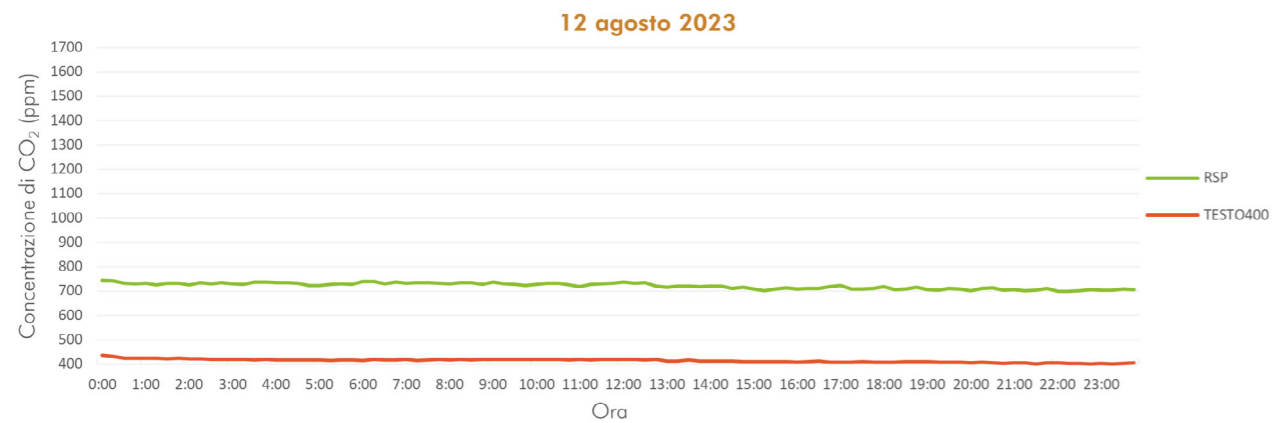


Grafico 19. Concentrazione di CO<sub>2</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

Il limite di concentrazione di biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) negli ambienti interni è un importante indicatore della qualità e del ricambio dell'aria. Gli standard e le raccomandazioni per la concentrazione di CO<sub>2</sub> possono variare, il BS EN 16798-1:2019 definisce delle categorie i cui limiti sono rappresentati dal valore di ppm esterni sommati ad un certo Delta (Tabella 09). Non è stato possibile definire i limiti a causa della mancanza misure dei valori esterni.

L'andamento della concentrazione è sempre costante a meno del giorno 11 dicembre, quando l'ambiente era occupato, a causa di una cattiva ventilazione dello spazio; questa problematica in futuro potrebbe essere risolta grazie alla nuova tecnologia di facciata che presenta un componente pensato appositamente, dotato di un filtro per la CO<sub>2</sub>, che al momento dell'analisi non era ancora stato montato.

11 dicembre 2023			
CO <sub>2</sub> (ppm)	Max	Min	Media
SENECA	1394,67	462,17	702,71
TESTO400	1666,00	474,00	766,99
Δ	271,33	11,83	64,28

Tabella 30. Valori di CO<sub>2</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato

9 dicembre 2023			
CO <sub>2</sub> (ppm)	Max	Min	Media
SENECA	473,33	428,33	451,41
TESTO400	486,00	443,00	464,10
Δ	12,67	14,67	12,69

Tabella 31. Valori di CO<sub>2</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

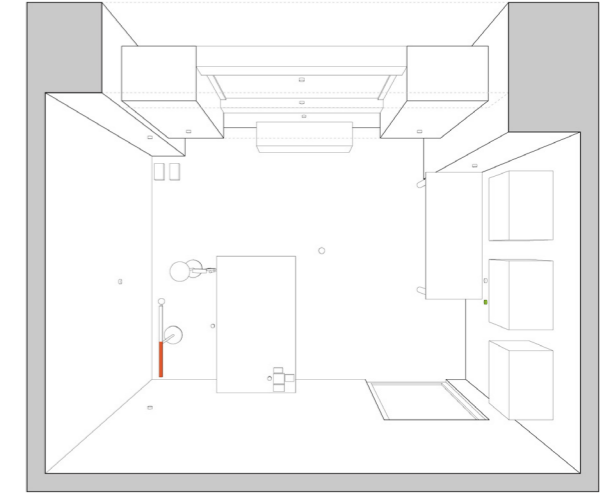


Immagine 31. Navigatore (CO<sub>2</sub>) stagione invernale

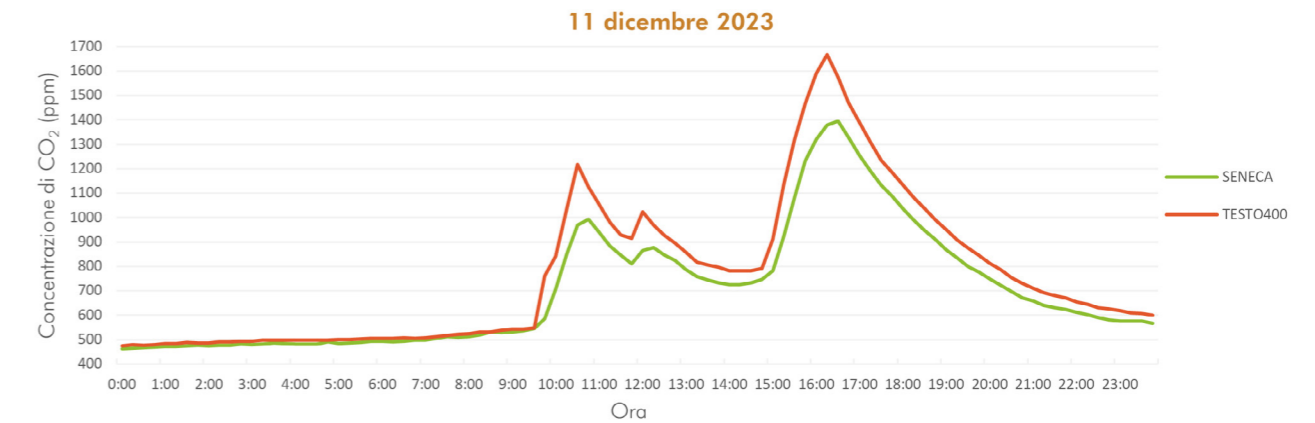


Grafico 20. Concentrazione di CO<sub>2</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato

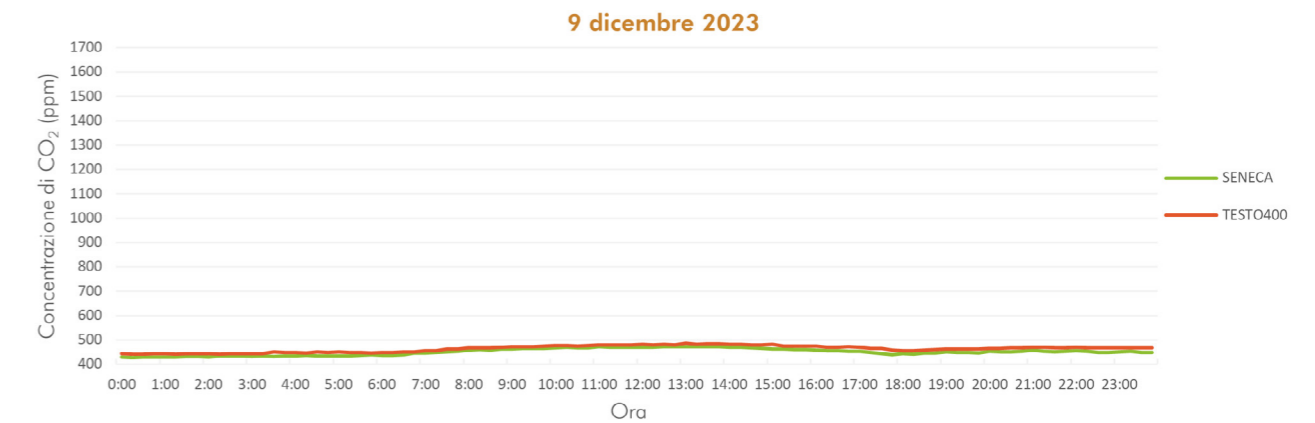


Grafico 21. Concentrazione di CO<sub>2</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

Rispetto alla valutazione dell'accuratezza è evidente come nella stagione estiva sia presente un gap di circa 300 ppm tra la misura effettuata dalla Stazione di Comfort e quella del Raspberry, come per le misure d'illuminamento è necessario agire sulla sua calibrazione. Mentre per le misure della stagione invernale si mantengono dei Delta minimi che vengono alterati dal posizionamento dei sensori, specialmente per le misure dell'11 dicembre, dove le misure ricavate dalla strumentazione Seneca risultano più basse poiché il sensore si trova in vicinanza della porta e quindi presenta una maggiore ventilazione.

## 5a.6. Esiti della valutazione dei sensori di misura

Le considerazioni effettuate sulle accuratezze dei singoli sensori sono da aggiungersi a quelle fatte sulle caratteristiche della strumentazione. È evidente come i sensori più costosi permettano di avere una quantificazione più accurata della misura, mentre per quelli economici è necessario prestare una maggiore accortezza nelle calibrazioni. Sicuramente un sensore *low-cost* presenta delle problematiche ma con i dovuti accorgimenti è possibile raggiungere le stesse prestazioni di un sensore *high-cost*. Grazie alle valutazioni effettuate è stato possibile definire di quali strumenti avvalersi per le considerazioni successive. Si è optato per utilizzare i dati raccolti dalla Stazione di Comfort, dal *Datalogger* (per la stagione invernale da Seneca) e dal luxmetro. Come verrà approfondito in seguito la metodologia definita, ipotizza anche l'utilizzo del *Raspberry* i cui dati però fanno sempre riferimento al *Datalogger* e a Seneca perché come specificato nel capitolo 4.2., nella fase sperimentale non è stato possibile calibrare adeguatamente i sensori e quindi i dati non sono stati ritenuti affidabili. In fine, oltre alle valutazioni sull'accuratezza sono stati esaminati, ove possibile, gli andamenti delle variabili nei confronti di alcuni range definiti dalle normative, ma ovviamente queste considerazioni non sono sufficienti a una caratterizzazione dello spazio, che invece verrà affrontata nei capitoli successivi

## 5b. Modelli di calcolo

Questo studio cerca di calcolare gli indici di valutazione del comfort, tramite infrastrutture di rilevamento tra loro diversificate principalmente da due caratteristiche: il costo e la tipologia e il numero di sensori. A una semplificazione del sensore corrisponde una complessificazione dei modelli di calcolo, accompagnata da un certo numero di assunzioni che possono inficiare sull'accuratezza del risultato finale; dal peso che la variabile risulta avere sul totale il modello può essere ritenuto più o meno preciso.

I modelli sono stati costruiti esclusivamente per il calcolo dei parametri di comfort termico, in base alla strumentazione disponibile nella fase di sperimentazione.

INDICI DI COMFORT	VARIABILI MISURATE	STRUMENTAZIONE
<b>COMFORT TERMICO</b>		
Temperatura operativa ( $T_{op}$ ) Voto medio previsto (PMV) Percentuale di insoddisfatti (PPD)	Temperatura dell'aria ( $T_a$ )	Stazione di Comfort
		Datalogger
		Aircare
		Termoigrometrico
		Raspberry
	Temperatura radiante ( $T_r$ )	Stazione di Comfort
	Temperatura superficiale ( $T_s$ )	Datalogger
		Raspberry
	Umidità relativa (RH)	Stazione di Comfort
		Datalogger
Aircare		
Termoigrometrico		
Velocità dell'aria ( $V_a$ )	Stazione di Comfort	
	Datalogger	
Radiazione solare (IR)	Datalogger	
Illuminamento verticale ( $E_v$ )	Raspberry	
	Luxmetro	

Tabella 32. Variabili e strumenti considerati per la valutazione del comfort termico

I modelli, e le loro combinazioni, sono stati sviluppati per il calcolo della temperatura media radiante, una variabile particolarmente complessa, che influenza notevolmente il comfort termico dell'occupante. Il *Gold standard*, usato come parametro di confronto per l'accuratezza dei modelli di calcolo, è la temperatura radiante misurata dal globotermometro della Stazione di Comfort. Il globotermometro è un sensore specifico per il calcolo della temperatura radiante, consiste in una struttura sferica di colore nero formata da diversi strati, composti con la finalità di riprodurre delle condizioni responsive simili a quelle della pelle umana; all'interno della sfera sono integrate delle termocoppie che misurano la variazione della temperatura superficiale, in risposta alle condizioni esterne.

A partire dal *Gold standard* sono stati pensati cinque gradi di semplificazione, definiti "Livelli", che differiscono per il tipo di strumentazione presa in considerazione: si inizia con un sistema *high-cost* particolarmente intrusivo fino ad arrivare a un sistema *low-cost* non intrusivo.

**Livello 1:** la temperatura radiante è misurata dal globotermometro della Stazione di Comfort.

**Livello 2:** la temperatura radiante viene calcolata direttamente attraverso le misurazioni fatte dal radiometro netto collegato al *Datalogger*.

**Livello 3:** la temperatura media radiante viene calcolata mediante la procedura descritta nel capitolo 2.2.2., attraverso le temperature superficiali delle pareti, del soffitto e del pavimento e i relativi fattori di vista; a cui si aggiunge la componente dovuta alla radiazione solare diretta, calcolata attraverso l'illuminamento, misurato da un luxmetro posizionato verticalmente, diviso per il fattore di efficienza luminosa della radiazione solare.

**Livello 3.1:** la  $T_{mr}$  e il Delta dovuto alla radiazione solare diretta usano gli stessi modelli del livello 3, ma la radiazione solare viene calcolata a partire dall'irraggiamento esterno misurato dal piranometro.

**Livello 4:** i modelli utilizzati sono gli stessi del livello 3, ma vengono fatte due assunzioni: le temperature superficiali, escluse quelle di facciata, sono considerate uguali a quella dell'aria interna e l'irraggiamento esterno non viene misurato ma definito da un database.

**Livello 5:** la procedura è quella del livello 4, ma vengono aggiunti due modelli per il calcolo delle temperature superficiali di facciata; a questo punto le uniche variabili misurate sono la temperatura dell'aria interna ed esterna.

High-cost						
Livello 1 (Gold standard)	Livello 2			Livello 3		
	Modello	Variabile	Strumento	Modello	Variabile	Strumento
Misurazione diretta della Stazione di Comfort	$T_{mr}$ da $S_{str}$	$R_{lw}$	Datalogger (radiometro)	$T_{mr}$ da ISO7726	$T_s$	Datalogger
		$R_{sw}$		$\Delta T_{mr}$	$R_{sol}$	
				$R_{sol}(Ev)$	$E_v$	Luxmetro

High-cost non intrusivo			Low-cost			Low-cost non intrusivo		
Livello 3.1			Livello 4			Livello 5 (low-cost)		
Modello	Variabile	Strumento	Modello	Variabile	Strumento	Modello	Variabile	Strumento
$T_{mr}$ da ISO7726	$T_s$	Datalogger	$T_{mr}$ da ISO7726	$T_{s(facciata)} + T_{ai} = T_s$	Raspberry	$T_{mr}$ da ISO7726	$T_{s(op)} + T_{s(tras)} + T_{ai} = T_{si}$	Raspberry
						$T_{s(op)}$	$T_{ai} + T_{ae}$	Raspberry + Database
$\Delta T_{mr}$	$R_{sol}$		$\Delta T_{mr}$	$R_{sol}$		$\Delta T_{mr}$	$R_{sol}$	
$R_{sol}$	$I_{est}$	Piranometro	$R_{sol}$	$I_{est}$	Database	$R_{sol}$	$I_{est}$	Database

Tabella 33. Modelli e variabili necessarie per il calcolo della temperatura media radiante

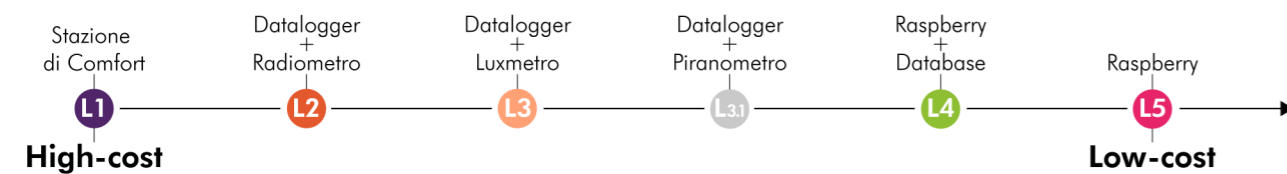


Immagine 32. Schematizzazione delle caratteristiche dei livelli

### 5b.1. Modello $T_{mr}$ ISO7726

Il fattore che influenza maggiormente il risultato della  $T_{mr}$  è la posizione dell'occupante, rispetto alla quale vengono definiti i fattori di vista ( $F_n$ ) tramite la costruzione geometrica descritta dall'immagine 02.

L'errore dovuto al solo utilizzo di questo modello risulta particolarmente evidente durante la stagione estiva, nelle ore in cui l'utente viene colpito dalla radiazione solare diretta. È per ovviare a questo problema che viene aggiunto il modello che calcola la  $\Delta T_{mr}$ .

Il livello 2 presenta un notevole Delta, nei picchi della stagione estiva, rispetto alla temperatura radiante misurata dal globotermometro, probabilmente a causa della formulazione utilizzata per determinare la  $T_{mr}$  che tiene conto anche della componente diretta.

$$S_{str} = a_k \sum_{i=1}^n R_{sw} F_i + \varepsilon \sum_{i=1}^n R_{lw} F_i \quad (27)$$

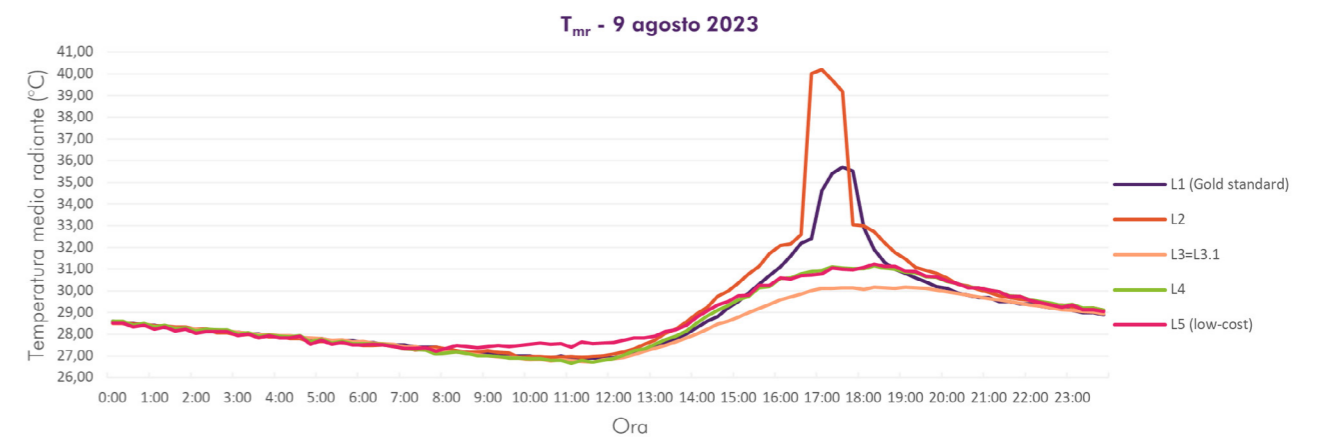


Grafico 22. Modello  $T_{mr}$  basato sulla norma ISO7726 per la stagione estiva nel giorno soleggiato

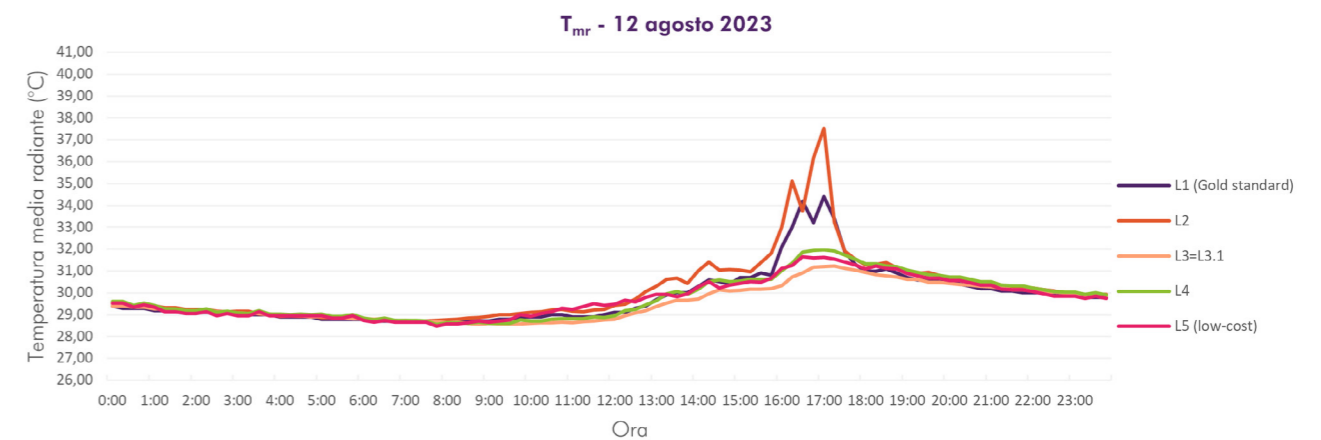


Grafico 23. Modello  $T_{mr}$  basato sulla norma ISO7726 per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

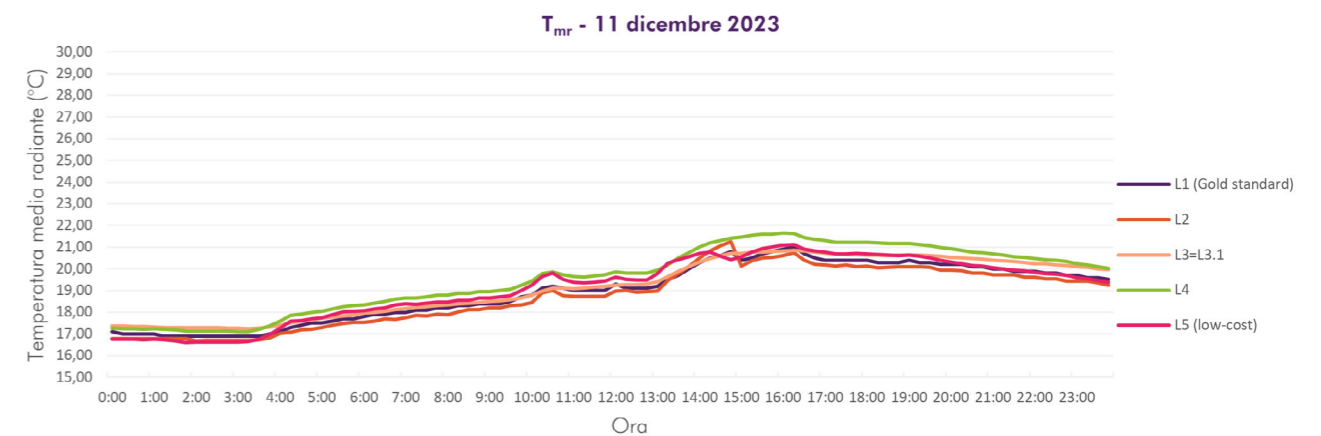


Grafico 24. Modello  $T_{mr}$  basato sulla norma ISO7726 per la stagione invernale nel giorno soleggiato

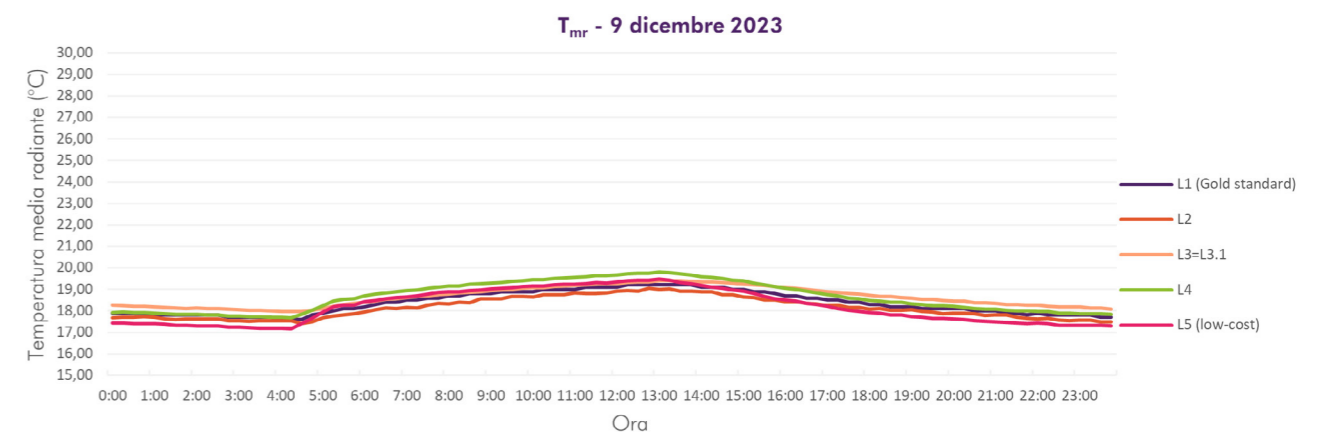


Grafico 25. Modello  $T_{mr}$  basato sulla norma ISO7726 per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

Dove:

$S_{str}$  = densità del flusso radiante del corpo umano

$R_{sw}$  = flusso radiante short-wave

$R_{lw}$  = flusso radiante long-wave

$F_i$  = fattore di vista dell'occupante

$\alpha_k$  = fattore di assorbimento ad onde corte (0,67)

$\epsilon$  = coefficiente di emissività del corpo umano (0,97)

Da qui può essere calcolate la temperatura radiante totale:

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{S_{str}}{\epsilon \cdot \sigma}} - 273,15 \quad (28)$$

Per quanto riguarda la semplificazione assunta nei livelli 4 e 5, il risultato presenta un Delta massimo di circa 1°C rispetto alla  $T_{mr}$  del livello 3. Durante la stagione estiva e nei giorni soleggiati la temperatura dell'aria interna aumenta durante le ore di sole diretto influenzando maggiormente il risultato finale, cosa che invece non avviene nella stagione invernale nei giorni nuvolosi. L'introduzione dei modelli per il calcolo delle temperature superficiali di facciata non influisce molto sulle prestazioni del livello 5 rispetto al 4.

9 agosto 2023		
Data	$\Delta \max$ (°C)	$\Delta \min$ (°C)
9 agosto 2023	10,09	0,02
12 agosto 2023	6,34	0,04
9 dicembre 2023	0,60	0,24
11 dicembre 2023	1,07	0,29

Tabella 34. Delta modello  $T_{mr}$

### 5b.1.1. Modello $T_s$

Nel livello 5, ipotizzando di utilizzare un sensore low-cost poco intrusivo per misurare la temperatura l'aria interna, si è ritenuto necessario introdurre un modello che calcolasse le temperature superficiali di facciata che, a differenza delle altre superfici, sono particolarmente influenzate dalle condizioni esterne.

Per quanto riguarda la temperatura dell'involucro trasparente è stata calcolata utilizzando un modello in Python, sviluppato in una sperimentazione precedente dalla Dottoranda Manuela Baracani.

Il modello relativo alla temperatura superficiale dei componenti di facciata è stato sviluppato a partire dalle prescrizioni del BS EN ISO 13788:2012, per il quale:

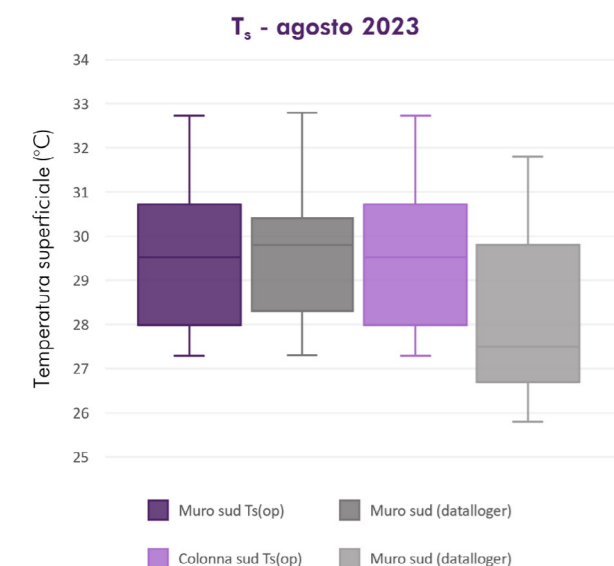


Grafico 26. Temperature dell'involucro opaco per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)

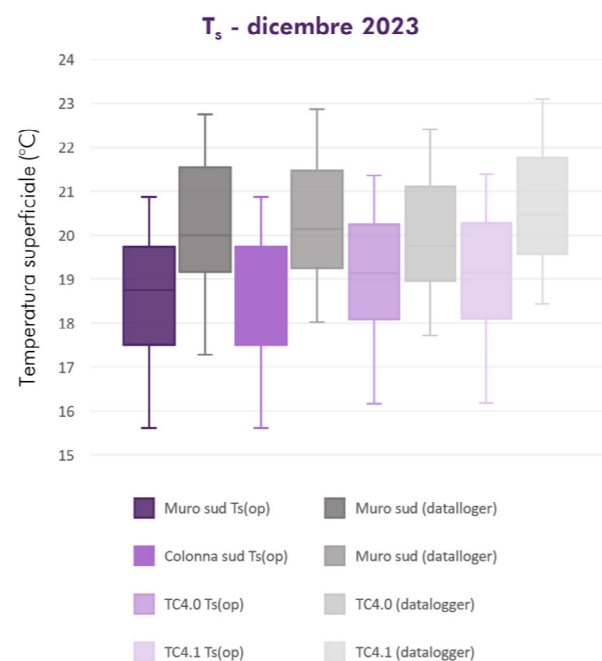


Grafico 27. Temperature dell'involucro opaco per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-13 dicembre)

$$T_{si} = T_{ai} - (U(T_{ai} - T_{ae})) \cdot R_{si} \quad (29)$$

Dove:

$T_{si}$  = temperatura superficiale interna (°C)

$T_{ai}$  = temperatura dell'aria interna (°C)

$U$  = trasmittanza termica del componente ( $W/m^2K$ )

$T_{ae}$  = temperatura dell'aria esterna (°C)

$R_{si}$  = coefficiente liminare interno

Per la temperatura dell'aria esterna è stata presa in considerazione quella misurata dalla strumentazione della TWIN-A, posizionata sul tetto della stessa manica del Politecnico, dove è collocato il *living-lab*. La trasmittanza delle pareti esistenti è stata calcolata secondo il BS EN ISO 6946:2017, attraverso un foglio di calcolo fornito dal Prof. Vincenzo Corrado; mentre per i nuovi componenti opachi installati è stato utilizzato il valore di trasmittanza definito dalle schede tecniche.

## 5b.2. Modello $\Delta T_{mr}$

Per considerare l'influenza della radiazione solare diretta sulla temperatura radiante percepita dall'occupante, sono stati analizzati due diversi modelli: il primo definito "DC Model", che è già stato valutato da diversi studi, e il secondo definito "Kantor Model", che invece è stato caratterizzato da questa trattazione; quest'ultimo è risultato equiparabile al modello già testato, e per questo utilizzato per le successive analisi.

### DC Model

Nonostante la radiazione solare influenzi la qualità del comfort degli occupanti e il consumo energetico degli edifici, non ha sempre ricevuto la giusta attenzione; negli ultimi anni per ovviare a questa mancanza l'ASHRAE 55 ha adottato un modello semplificato incentrato sull'occupante (SC Model), accompagnato da una simulazione che utilizza il coefficiente di luce diurna (DC Model). He Y. et al. (2021) hanno estrapolato, dalla procedura definita dalla normativa, le componenti necessarie per il calcolo del  $\Delta T_{mr}$ .

$$\Delta T_{mr} = \frac{ERF_{solar}}{f_{eff} h_r} \quad (30)$$

Dove:

$\Delta T_{mr}$  = delta della temperatura media radiante dovuto alla radiazione solare (°C)

$ERF_{solar}$  = campo radiante efficace (flusso energetico radiante sul/dal corpo umano) della radiazione solare ( $W/m^2$ ).

$f_{eff}$  = frazione di superficie corporea esposta alla radiazione (0,696 per una persona seduta)

$h_r$  = coefficiente di trasferimento del calore ( $W/m^2K$ )

$$ERF_{solar} = \frac{\alpha_{sw}}{\alpha_{lw}} \sum_{i=1}^n \frac{R_{sol,i} \cdot A_i}{A} \quad (31)$$

Dove:

$\alpha_{sw}$  = coefficiente di assorbimento ad onde corte (0,67)

$\alpha_{lw}$  = coefficiente di assorbimento ad onde lunghe (0,95)

$R_{sol,i}$  = radiazione solare incidente sulla superficie perpendicolare ( $W/m^2$ )

$A_i$  = area colpita dalla radiazione solare ( $m^2$ )

$A$  = area totale dell'occupante ( $m^2$ )

Per il coefficiente di trasferimento del calore invece di utilizzare il valore standard definito dalla normativa ( $6,012 W/m^2K$ ), si è deciso di calcolarlo facendo riferimento al procedimento definito da Tzempelikos A. et al. (2010).

$$h_r = 4 \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot 0,7 \cdot \left( 273,15 + \frac{T_{cl} + T_{mr}}{2} \right)^3 \quad (32)$$

Dove:

$\epsilon$  = coefficiente di emissività dei vestiti (0,95)

$\sigma$  = costante di Stefane-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )

$T_{cl}$  = temperatura dei vestiti (°C)

$T_{mr}$  = temperatura media radiante (°C)

$$T_{cl} = \left( \frac{Q_c}{f_{cl} \cdot h_c} \right) + T_{ai} \quad (33)$$

Dove:

- $Q_c$ = perdite di calore per convezione ( $W/m^2$ )
- $f_{cl}$ = fattore di area dei vestiti (0,725)
- $h_c$ = coefficiente di trasferimento del calore per convezione ( $W/m^2K$ )
- $T_{ai}$ = temperatura dell'aria interna ( $^{\circ}C$ )

$$Q_c = f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_{ai}) \quad (34)$$

$$h_c = \max\{8,3V_a^{0,6}; 3,1\} \quad (35)$$

Con:

$V_a$ = velocità dell'aria (m/s)

### Kantor Model

Partendo da uno studio sulla temperatura media radiante effettuato da Kantor N. e Unger J. (2011) si è deciso di sviluppare un nuovo modello basato sulla densità del flusso di radiazione totale, che rappresenta l'energia guadagnata dall'occupante; influenzata dai parametri che descrivono posizione e orientamento della persona e delle sorgenti radianti e dai coefficienti di assorbimento del corpo e delle superfici. Secondo questa teoria la  $T_{mrt}$  totale è uguale:

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \cdot \sum_{i=1}^n \left( E_i + a_k \cdot \frac{D_i}{\varepsilon} \right) \cdot f_i + \frac{f_p \cdot a_k \cdot R_{sol}}{\varepsilon \cdot \sigma}} \quad (36)$$

Dove:

- $\sigma$ = costante di Stefane-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )
- $E_i$ = radiazione solare diffusa a onde lunghe ( $W/m^2$ )
- $D_i$ = radiazione solare diffusa a onde corte ( $W/m^2$ )
- $a_k$ = coefficiente di assorbimento dei vestiti (0,7)
- $\varepsilon$ = coefficiente di emissività dei vestiti (0,95)
- $f_i/f_p$ = fattori che descrivono la posizione e l'orientamento della persona e delle sorgenti radianti tra loro
- $R_{sol}$ = radiazione solare incidente sulla superficie perpendicolare ( $W/m^2$ )

Mentre la temperatura media radiante, senza la componente dovuta alla radiazione solare diretta è uguale:

$$T_{mr} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \cdot \sum_{i=1}^n \left( E_i + a_k \cdot \frac{D_i}{\varepsilon} \right) \cdot f_i} \quad (37)$$

Confrontando tra loro le due equazioni, è possibile constatare che:

$$\Delta T_{mr} = \sqrt[4]{\frac{f_p \cdot a_k \cdot R_{sol}}{\varepsilon \cdot \sigma}} \quad (38)$$

Considerando che  $T_{mr}$  è la temperatura radiante calcolata attraverso la norma ISO7726, la temperatura media radiante totale è uguale:

$$T_{mrt} = \left( (T_{mr} + 273,15)^4 + \sqrt[4]{\frac{f_p \cdot a_k \cdot R_{sol}}{\varepsilon \cdot \sigma}} \right) - 273,15 \quad (39)$$

In entrambi i modelli la componente direttamente misurabile dai sensori è la radiazione solare incidente sulla superficie perpendicolare ( $R_{sol}$ ), per la quale sono stati creati ulteriori modelli di calcoli.

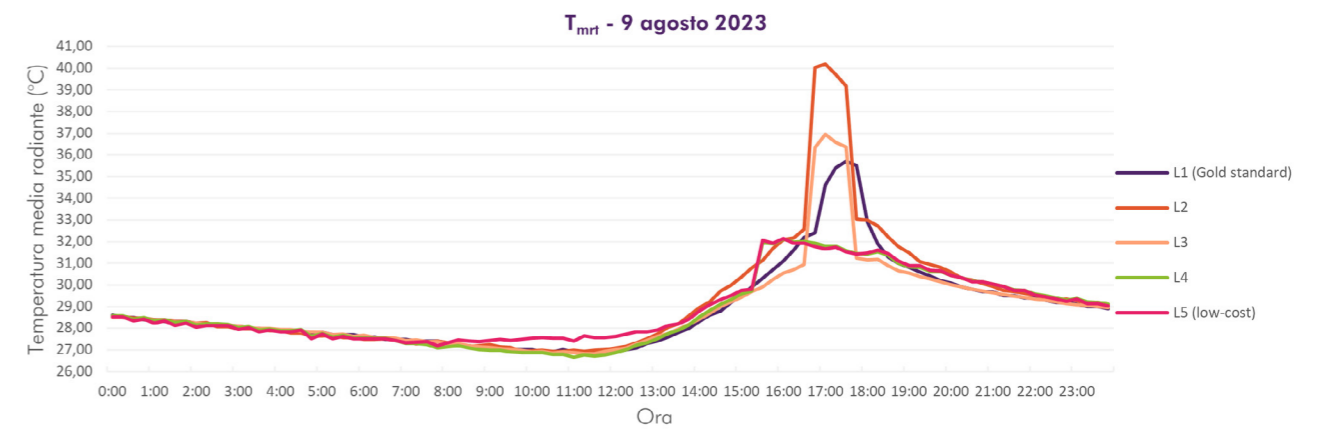


Grafico 28. Modello  $\Delta T_{mr}$  per la stagione estiva nel giorno soleggiato

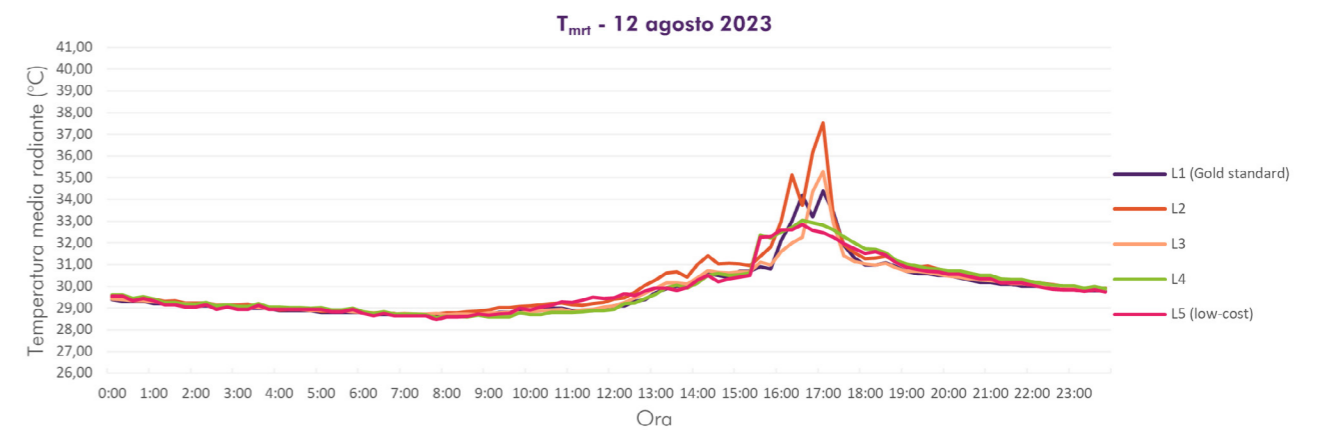


Grafico 29. Modello  $\Delta T_{mr}$  per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

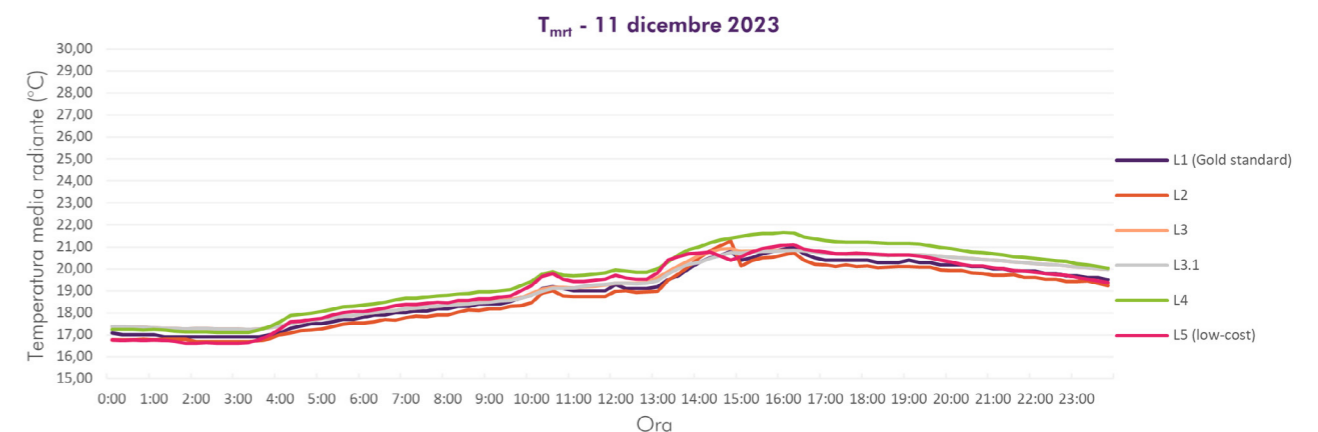


Grafico 30. Modello  $\Delta T_{mr}$  per la stagione invernale nel giorno soleggiato

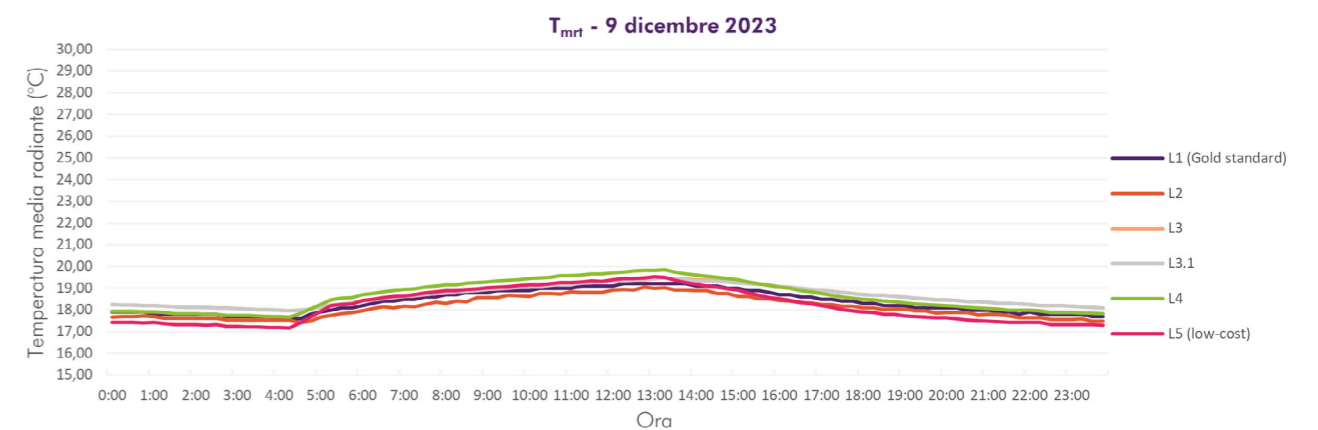


Grafico 31. Modello  $\Delta T_{mr}$  per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

9 agosto 2023		
Data	$\Delta \text{ max } (^{\circ}\text{C})$	$\Delta \text{ min } (^{\circ}\text{C})$
9 agosto 2023	8,55	0,03
12 agosto 2023	5,07	0,06
9 dicembre 2023	0,88	0,26
11 dicembre 2023	0,99	0,09

Tabella 35. Delta modello  $\Delta T_{mr}$

### 5b.2.1. Modello $R_{sol(E_v)}$

Nel livello 2 la componente di radiazione solare incidente sull'occupante è stata misurata dal radiometro, collegato al *Datalogger* e posizionato alla stessa altezza del globotermometro. Il radiometro utilizzato per la sperimentazione risulta essere molto costoso e ingombrante, per questo si è optato per una semplificazione atta alla sua eliminazione. In primo luogo, nel livello 3, è stato sostituito con un luxmetro posizionato verticalmente nella stessa posizione, che risulta comunque intrusivo ma diminuisce notevolmente i costi.

La definizione di questo modello, che collega la radiazione solare incidente all'illuminamento verticale, è basata sull'efficienza luminosa della radiazione solare che dipende da: altezza solare, copertura nuvolosa e contenuto di vapor d'acqua in atmosfera.

$$\eta = \frac{\phi_L}{\phi_e} = \frac{E}{I} \quad (40)$$

Dove:

$\eta$  = efficienza luminosa (lm/W)

$\phi_L$  = flusso luminoso (lm)

$\phi_e$  = flusso energetico (W)

$E$  = illuminamento (lx)

$I$  = radiazione solare incidente (W/m<sup>2</sup>)

Da questa formula:

$$R_{sol} = \frac{E_v}{\eta} \quad (41)$$

Per la definizione dell'efficienza luminosa, si è optato per utilizzare dei valori standard, e non sono state portate avanti considerazioni più approfondite basate su posizione solare e modelli di cielo, ma per sperimentazioni future sarebbe interessante comprendere l'impatto di queste valutazioni più specifiche.

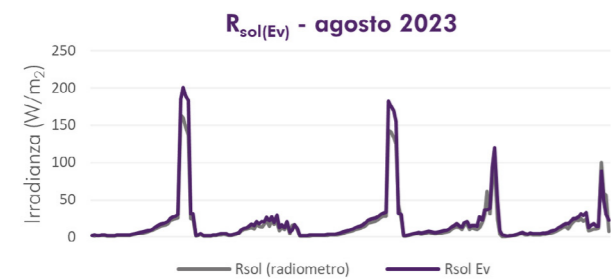


Grafico 32. Radiazione solare ( $E_v$ ) per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)

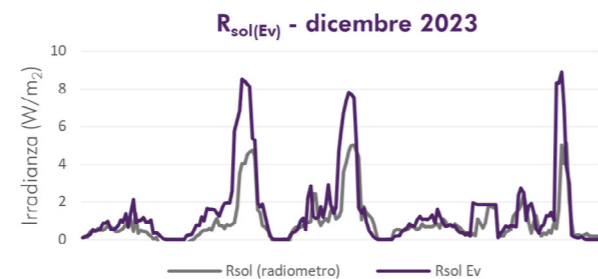


Grafico 33. Radiazione solare ( $E_v$ ) per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-13 dicembre)

### 5b.2.2. Modello $R_{sol}$

Per rendere la strumentazione meno intrusiva nel livello 3.1 viene utilizzato un piranometro esterno solo per la stagione invernale, poiché non è stato possibile installarlo nella prima fase di misurazione; mentre nel livello 4 e 5 vengono utilizzati dei valori derivanti dai database del Politecnico di Torino. Il modello utilizzato è lo stesso, cambiano solamente i dati d'irradianza. Per passare da un'irradianza esterna a una interna in un punto, bisogna in primo luogo definire quando il punto viene colpito da radiazione solare; per fare ciò è necessario conoscere il percorso del Sole, nel giorno preso in considerazione, e lo Zenit e l'Azimut del punto.

I dati riferiti alla posizione solare nei giorni analizzati sono stati estrapolati da database online, dai quali è stato estratto il diagramma solare che rappresenta il percorso annuale del Sole rispetto alle coordinate del TEBE L<sup>2</sup>AB. A queste considerazioni va aggiunto che la ragione che riesce a entrare all'interno dell'edificio è condizionata dalle

caratteristiche dell'involucro trasparente, nello specifico dal fattore di trasmissione solare, che è più che dimezzato tra la prima e la seconda configurazione.

$$\text{Se } \alpha < zn_{sol} < \alpha + zn_{oc} \text{ e } \beta < az_{sol} < \beta + az_{oc} \Rightarrow R_{sol} = I_{est} \cdot \tau_{sol} \cdot A_i \quad (39)$$

$$\text{Se } zn_{sol} < \alpha \text{ e } zn_{sol} > \alpha + zn_{oc} \text{ e } az_{sol} < \beta \text{ e } az_{sol} > \beta + az_{oc} \Rightarrow R_{sol} = 0 \quad (40)$$

Dove:

$zn_{sol}$  = angolo zenitale solare

$az_{sol}$  = angolo azimutale solare

$I_{est}$  = irradianza esterna (W/m<sup>2</sup>)

$\tau_{sol}$  = fattore di trasmissione solare del vetro

$A_i$  = area colpita dalla radiazione solare (m<sup>2</sup>)

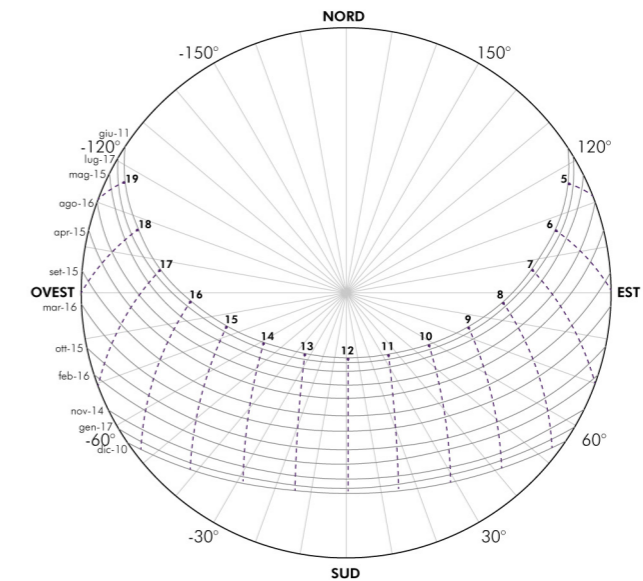


Immagine 33. Diagramma solare TEBE L<sup>2</sup>AB

Gli angoli zenitali e azimutali riferiti alla posizione dell'occupante sono stati definiti per entrambe le configurazioni della facciata.

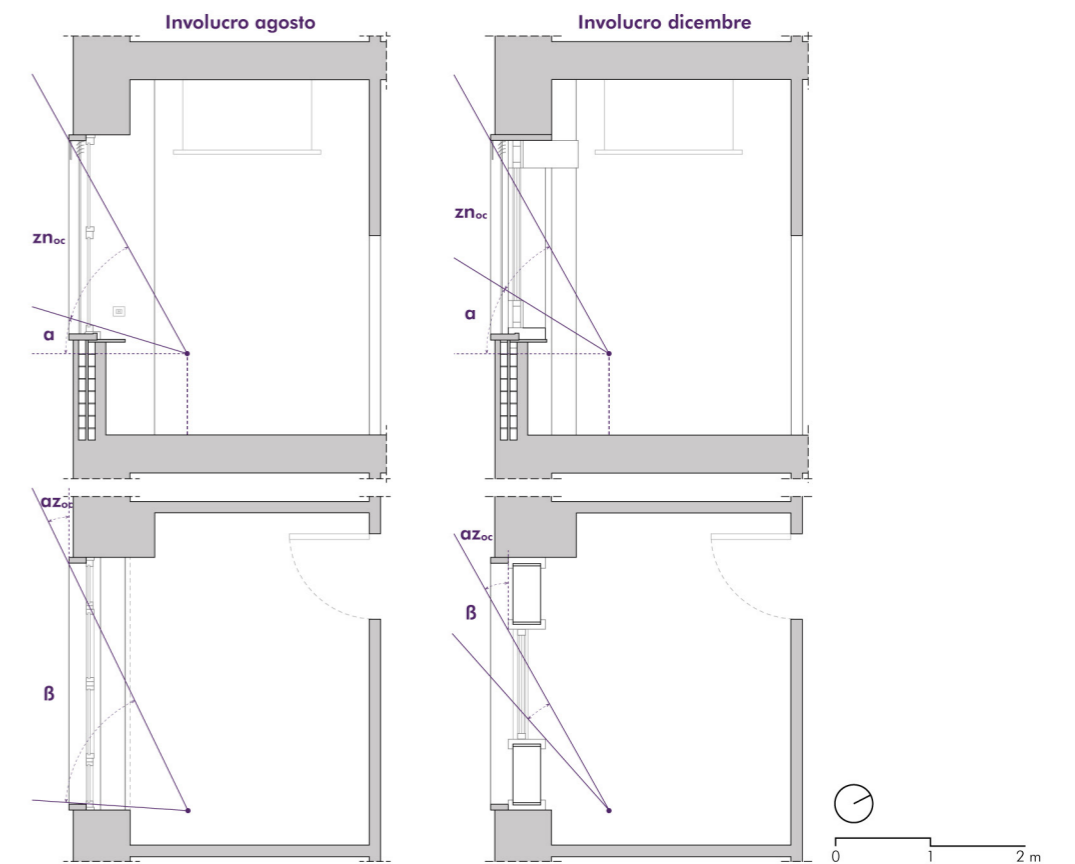


Immagine 34. Angolo zenitale e azimutale TEBE L<sup>2</sup>AB



### 5b.3. Esiti della valutazione dei modelli di calcolo

Attraverso la definizione dei livelli è chiaro come la combinazione dei modelli permetta di diminuire il numero di variabili necessarie, permettendo di semplificare conseguentemente la strumentazione di misura. Oltre alla costruzione dei modelli di calcolo che è stata per questa ricerca un tassello fondamentale al quale è stata dedicata molta attenzione, sono state definite anche delle assunzioni importanti. In particolare, nel livello 4 e 5 la temperatura delle superfici non confinanti con l'esterno è stata definita uguale a quella dell'aria interna, questa dichiarazione può sembrare molto azzardata, ma l'oggetto dell'analisi è un ufficio di dimensioni relativamente piccole dove quindi non è presente una particolare stratificazione dell'aria e inoltre l'obiettivo finale non è il calcolo della temperatura media radiante ma una valutazione degli indici di comfort sul lungo termine. Un'ulteriore considerazione può essere fatta nei confronti della radiazione solare per la quale è evidente come la prestazione del valore finale cambi notevolmente, passando da una radiazione misurata in situ a dei valori provenienti da database riferiti a stazioni dislocate altrove, specialmente per la stagione di raffrescamento; questo avviene anche a causa della costruzione geometrica necessaria per il calcolo della posizione solare e degli angoli zenitali e azimutali riferiti al punto che sicuramente si trascinano dietro un certo errore. In seguito, verrà approfondito come il peso di queste assunzioni influisce sui risultati finali.

## 5c. Indici di comfort

Per poter classificare un ambiente rispetto alla performance è necessario calcolare e valutare gli indici di comfort, che hanno l'obiettivo di definire la qualità dello spazio attraverso un unico valore rappresentativo del possibile soddisfacimento dell'occupante. Ci sono numerosi studi che hanno valutato le corrispondenze tra le diverse teorie del comfort e la veridicità dei KPIs rispetto alle reali condizioni percepite dall'occupante; la finalità di questo lavoro è invece quella valutare l'incidenza del tipo d'infrastruttura di monitoraggio sulla valutazione complessiva del comfort.

I KPIs dipendono da numerose variabili, come detto nel capitolo precedente, la più importante e complessa è la  $T_{mr}$ . Infatti, i modelli per il calcolo degli indici sono stati basati sulla scalare semplificazione studiata per la temperatura media radiante, anche perché non è stato possibile misurare attivamente altre variabili importanti, come l'isolamento degli indumenti o il tasso metabolico. Confrontando i diversi livelli d'analisi sul breve e lungo termine si può arrivare a comprendere l'impatto che le variabili e i modelli, spiegati nel capitolo precedente, hanno sull'indice finale.

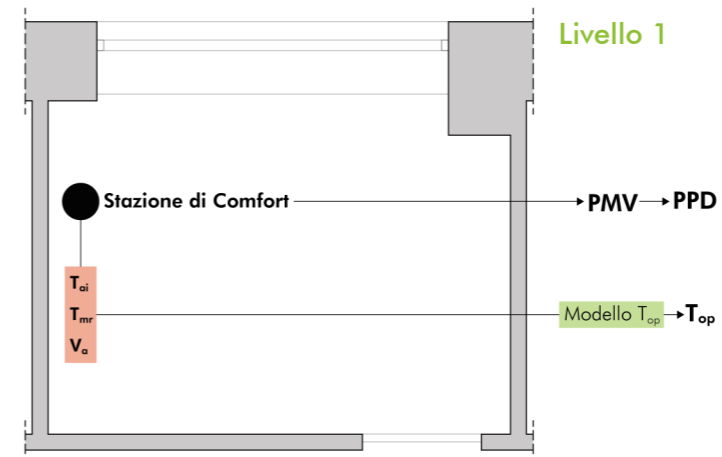


Immagine 35. Schematizzazione del funzionamento del livello 1

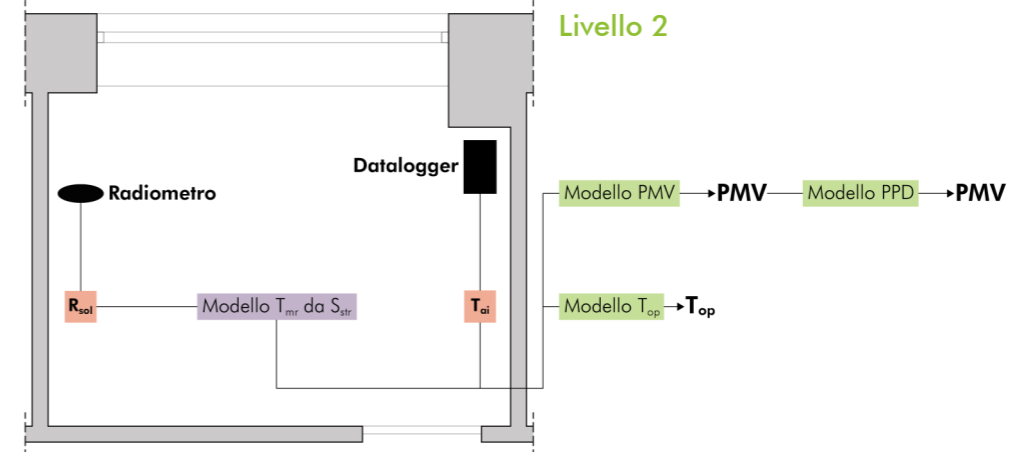


Immagine 36. Schematizzazione del funzionamento del livello 2

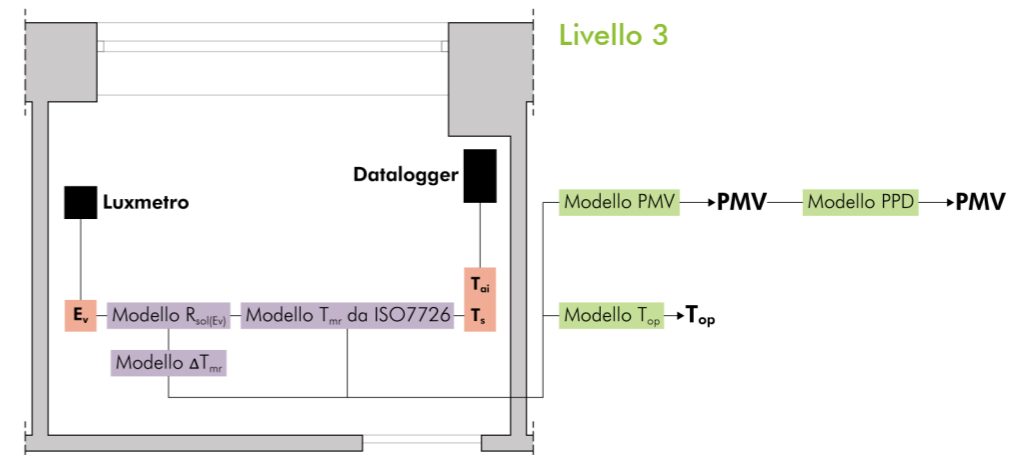


Immagine 37. Schematizzazione del funzionamento del livello 3

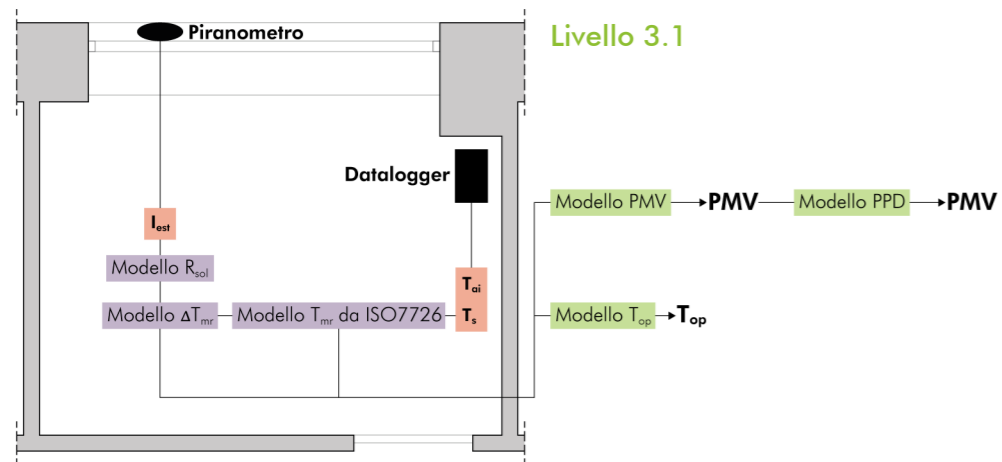


Immagine 38. Schematizzazione del funzionamento del livello 3.1

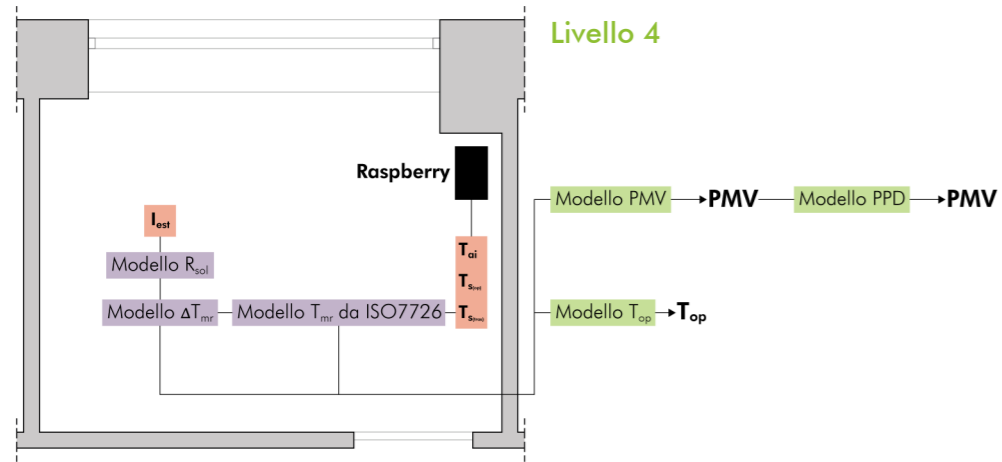


Immagine 39. Schematizzazione del funzionamento del livello 4

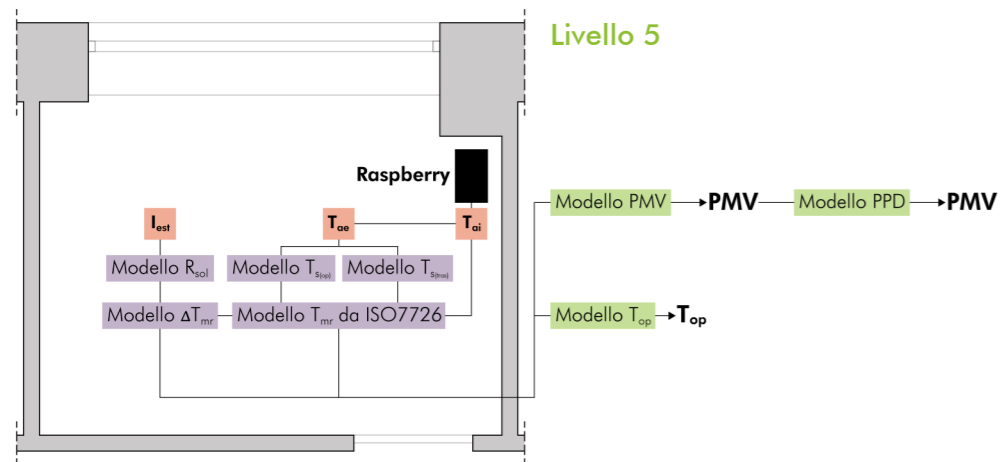


Immagine 40. Schematizzazione del funzionamento del livello 5

Visualizzando graficamente il processo dietro al calcolo degli indici di comfort è possibile comprendere come venga progressivamente complessificata la postproduzione delle misure effettuate dalla strumentazione. Avendo ben chiara la composizione di ogni livello, si può passare alla valutazione dell'accuratezza dei singoli indici.

### 5c.1. Temperatura operativa ( $T_{op}$ )

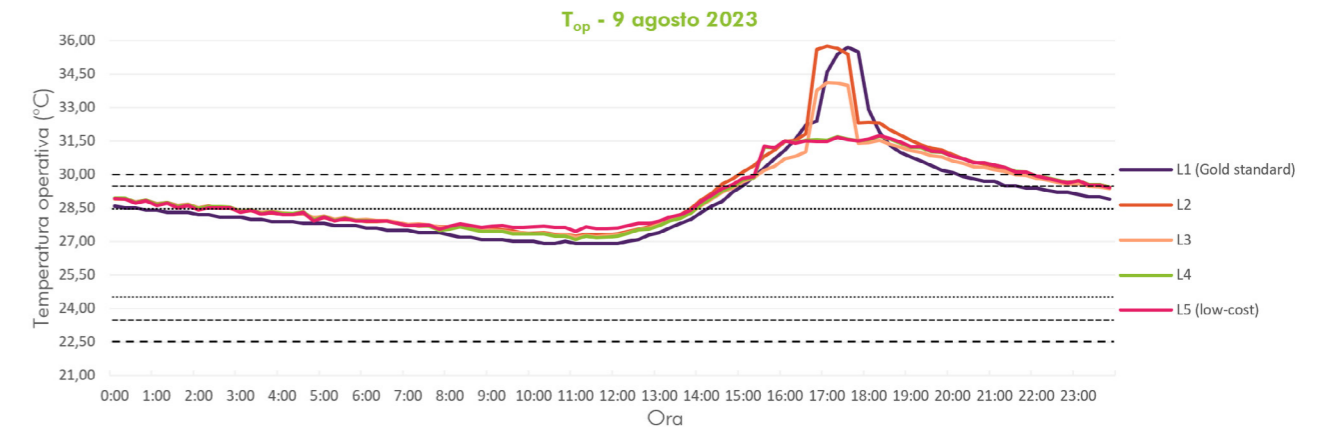


Grafico 34. Modello  $T_{op}$  per la stagione estiva nel giorno soleggiato

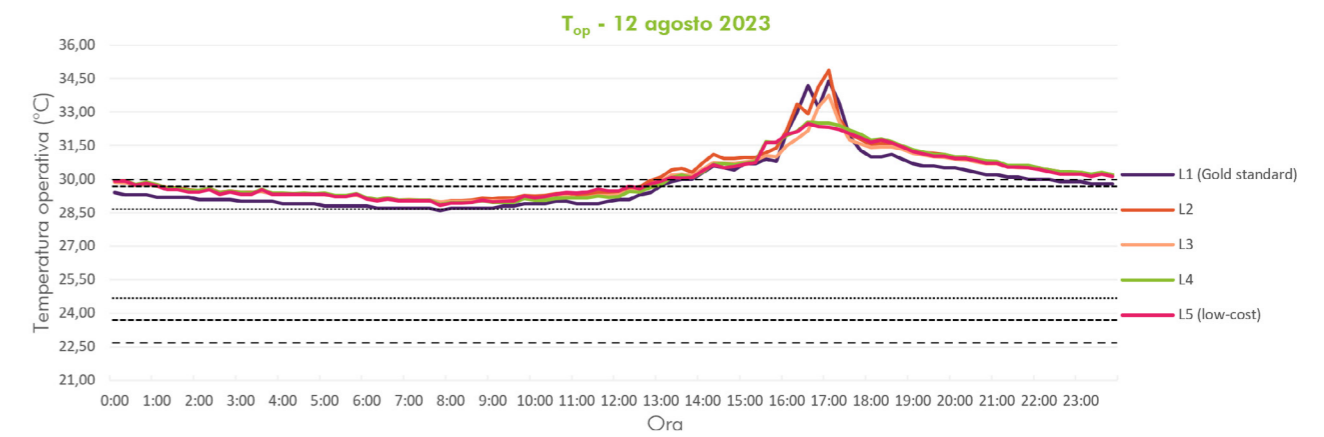


Grafico 35. Modello  $T_{op}$  per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

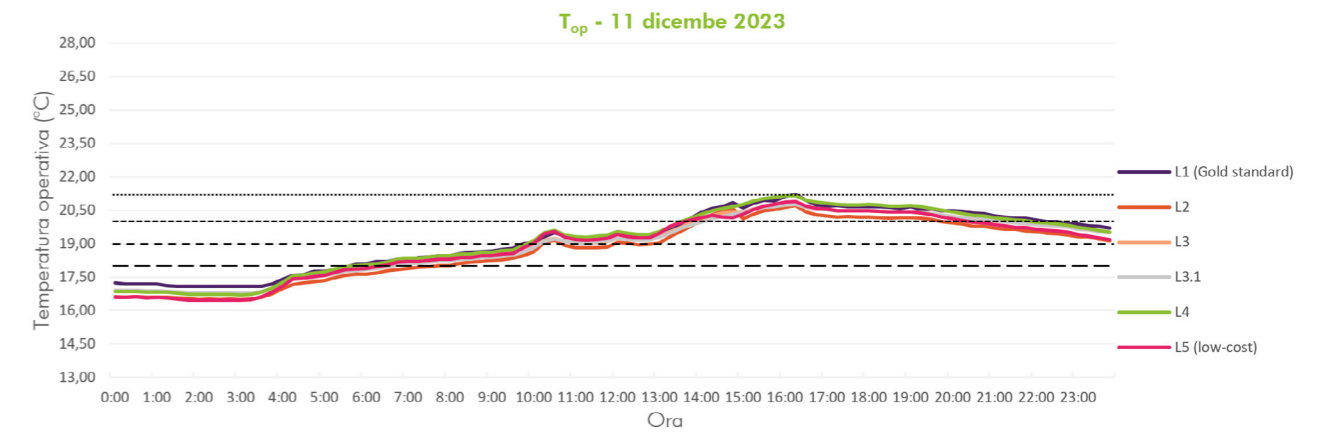


Grafico 36. Modello  $T_{op}$  per la stagione invernale nel giorno soleggiato

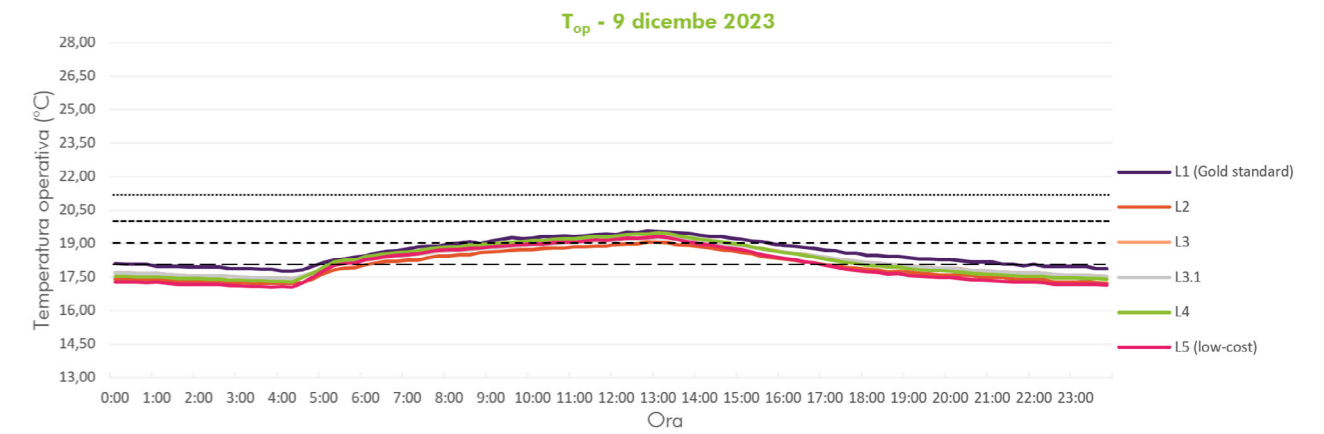


Grafico 37. Modello  $T_{op}$  per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

Per il calcolo della temperatura operativa si è optato per l'utilizzo della formula (2) descritta nel capitolo 2.2.1., che considera dei valori standard di velocità dell'aria, poiché a causa di alcuni malfunzionamenti dei sensori non è stato possibile collezionare interamente il dato.

Valutando il comportamento del modello per i giorni tipo (Cap. 5a) si può notare che l'andamento dei valori di  $T_{op}$  segue per lo più quello della temperatura media radiante, portandosi dietro l'accuratezza dei modelli precedenti. La differenza sta nei valori di picco della temperatura, che risultano diminuire; per quanto riguarda la  $T_{mrt}$  i livelli 2 e 3 superano il Gold standard, ciò non si ripete per il modello  $T_{op}$ . Da questo si può constatare che il peso della radiazione solare ( $R_{sol}$ ) e, di conseguenza del  $\Delta T_{mr}$  diminuiscono nel calcolo dell'indice di comfort. Rimane evidente lo scostamento dovuto all'utilizzo di dati da database esterni.

Per arrivare a una valutazione qualitativa dello spazio è necessario analizzare il comportamento dell'indice nel lungo periodo e rispetto alla stagione di raffreddamento e riscaldamento separatamente.

### Stagione estiva

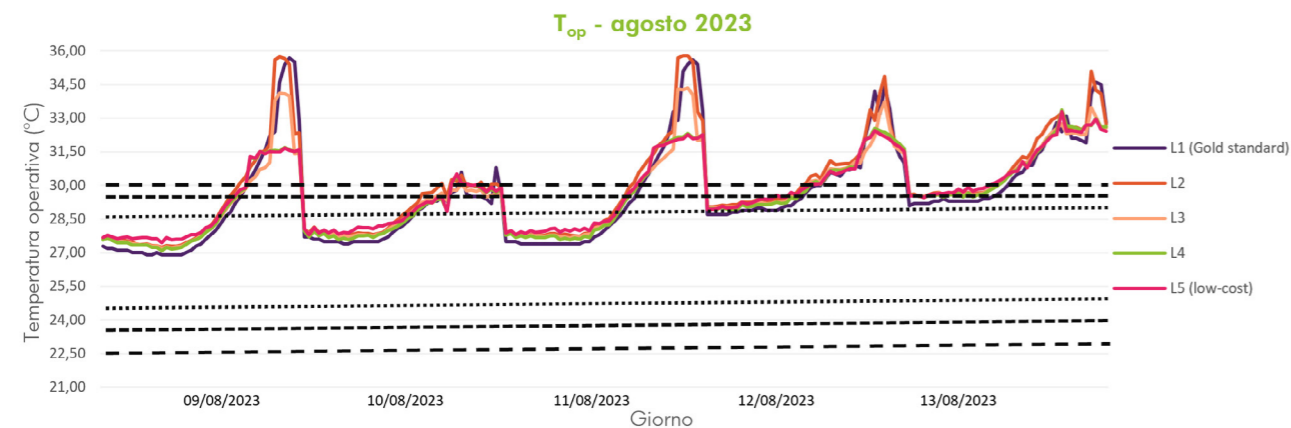


Grafico 38. Modello  $T_{op}$  per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)

Per la stagione di raffreddamento vengono presi in esame cinque giorni consecutivi, solo per le ore in cui l'ambiente occupato (8:00-18:00); purtroppo a causa di problemi con la strumentazione di misura non è stato possibile considerare più giorni.

Osservando l'andamento della temperatura operativa sul lungo termine è evidente come siano da tenere in considerazione solo i limiti superiori, calcolati secondo la teoria del comfort adattivo (Grafico 01), tenendo conto che l'ambiente, nei giorni presi in considerazione, non presenta un impianto di raffreddamento attivo.

Analizzando il comportamento dei livelli su un periodo più lungo, possono essere aggiunte ulteriori osservazioni. In particolare, si può notare come più il picco sale rapidamente minore è l'accuratezza dovuta al modello  $R_{sol}$ ; questo

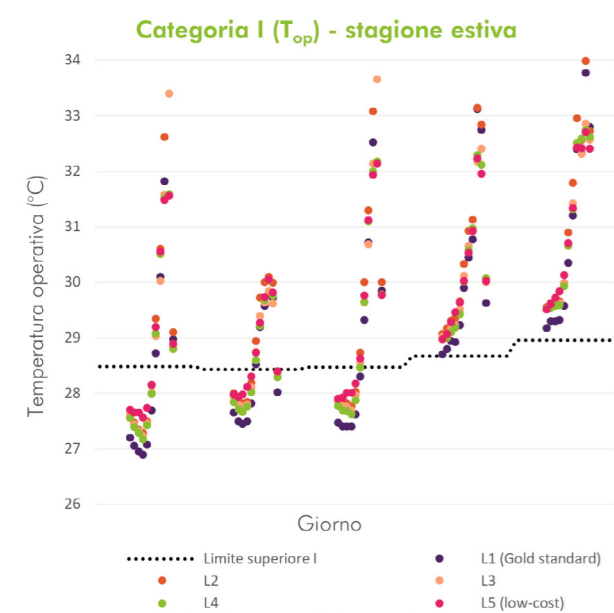


Grafico 39. Valori delle  $T_{op}$  rispetto alla Categoria I per la stagione estiva (9-13 agosto)

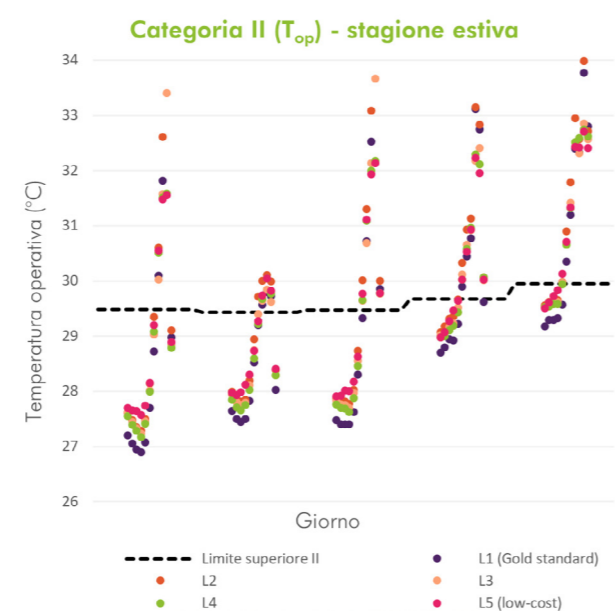


Grafico 40. Valori delle  $T_{op}$  rispetto alla Categoria II per la stagione estiva (9-13 agosto)

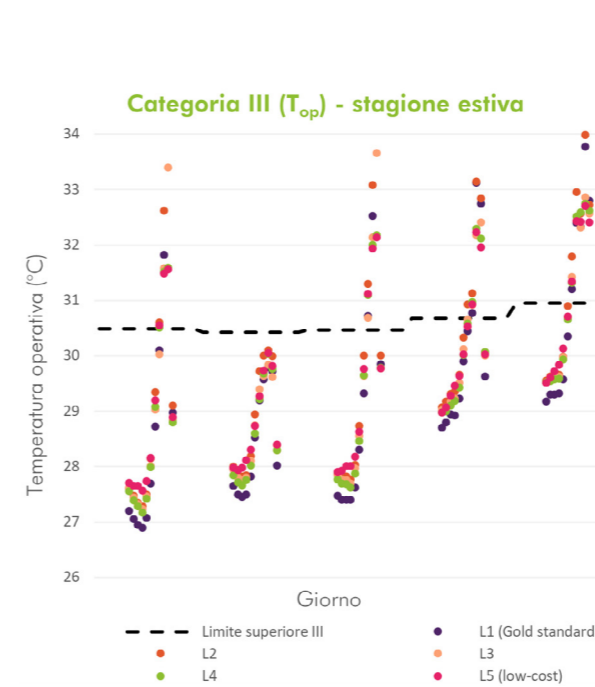


Grafico 41. Valori delle  $T_{op}$  rispetto alla Categoria III per la stagione estiva (9-13 agosto)

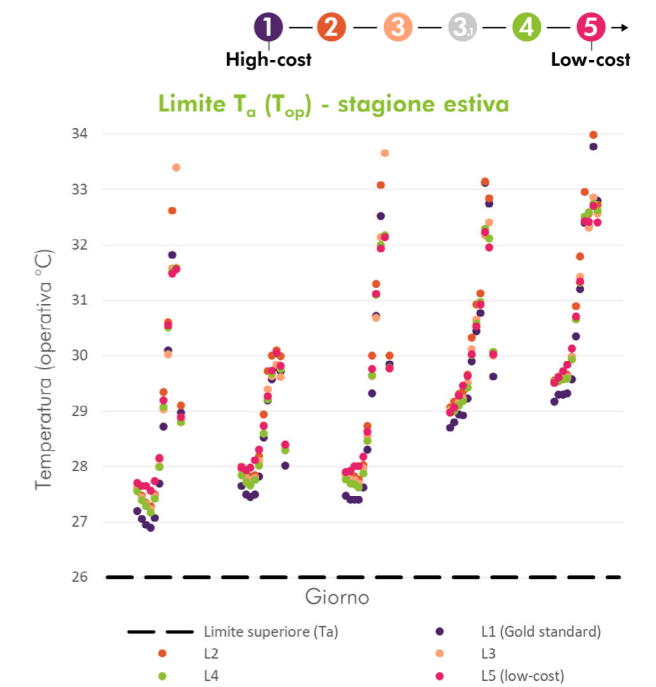


Grafico 42. Valori delle  $T_{op}$  rispetto allimito di  $T_a$  per la stagione estiva (9-13 agosto)

accade perché risulta molto difficile prevedere attraverso modelli matematici dei cambi repentini del meteo, che causano sbalzi di temperatura simili.

È necessario valutare le temperature operative rispetto a ognuna delle tre categorie per definire in quale di queste rientra; inoltre, si è ritenuto interessante aggiungere un ulteriore confronto rispetto ai limiti di temperatura dell'aria definiti all'ASHRAE (Cap. 5a.1.).

Per valutare la temperatura operativa si è deciso di utilizzare, per il calcolo degli indici, sia il metodo A che tiene conto della percentuale di ore di superamento, sia il metodo B che aggiunge alle considerazioni del metodo A un fattore di pesatura basato sul Delta rispetto al limite superato (Cap. 2.2.1.). Per queste analisi non vengono considerati i limiti di temperatura dell'aria, perché le temperature operative sono sempre al di sopra dei 26°C.

Per identificare la categoria di appartenenza dell'ambiente per la stagione estiva non è sufficiente conoscere le ore di superamento del limite ma è necessario definire la quantità di tempo, sul totale, in cui la temperatura operativa si trova all'interno di esso (Tabella 05). Secondo la normativa, se prendiamo in considerazione come intervallo di tempo una settimana, è sufficiente che almeno il 20% delle ore d'occupazione rientri nei limiti definiti dalla categoria.

Il risultato finale per il metodo A definisce l'ambiente nella **Categoria I**, ugualmente per tutti i livelli, il metodo B invece non permette una valutazione di questo genere.

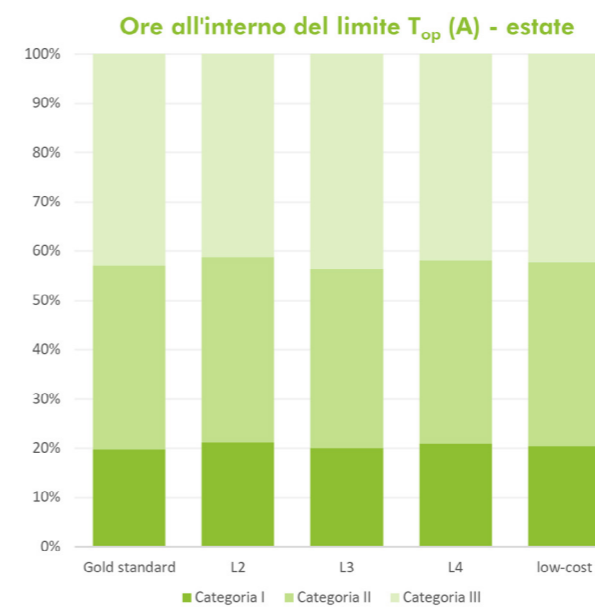


Grafico 43. Categorie secondo il metodo A (16798-2) per la stagione estiva (9-13 agosto)

Ore di superamento del limite di $T_{op}$ (A) - stagione estiva						
Categoria	L1	L2	L3	L4	L5	$\Delta$ max
I	67%	69%	69%	67%	69%	2%
II	38%	45%	44%	42%	44%	4%
III	29%	40%	33%	35%	36%	7%

Tabella 36. Risultati metodo A per la stagione estiva (9-13 agosto)

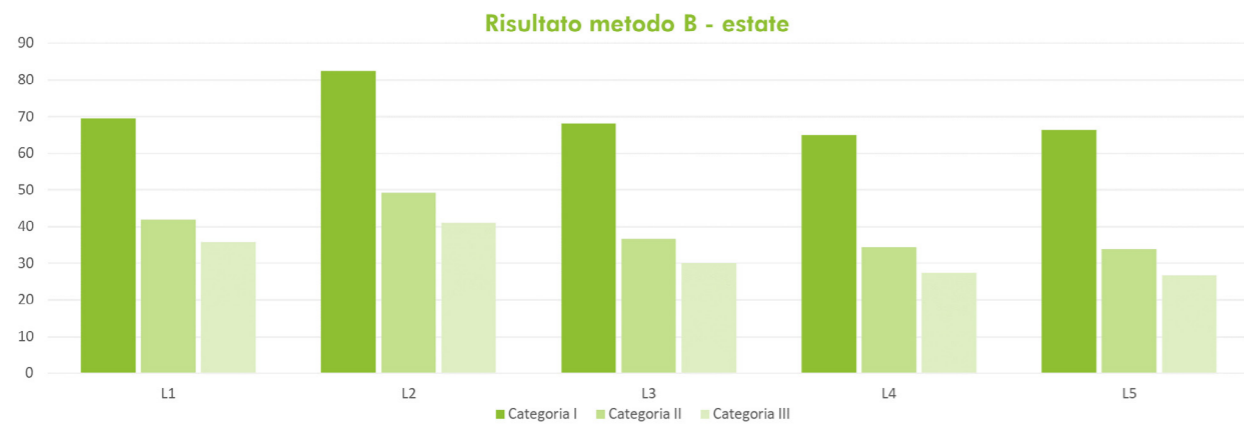


Grafico 44. Risultati metodo B per la stagione estiva (9-13 agosto)

Stagione invernale

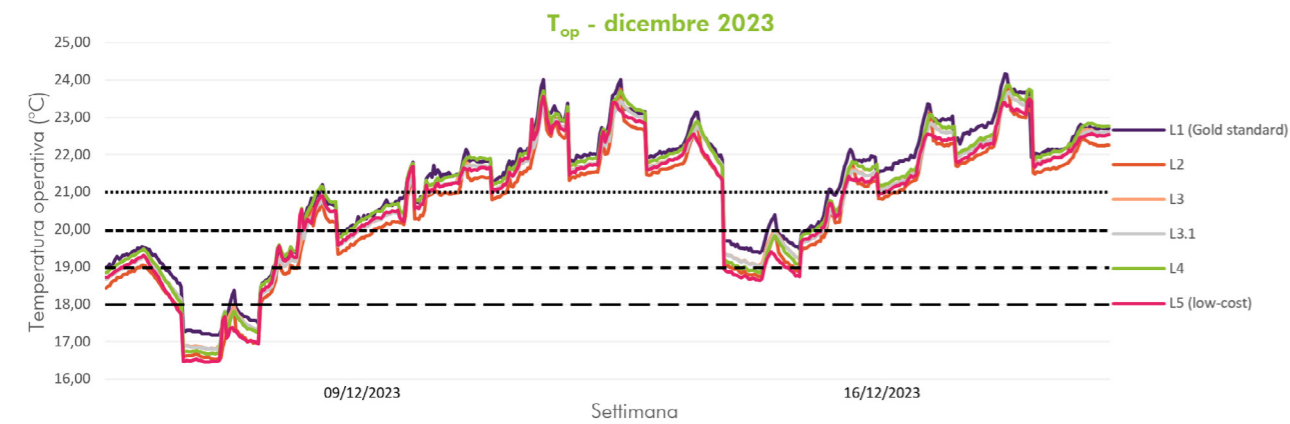


Grafico 45. Modello  $T_{op}$  per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-21 dicembre)

Per la valutazione dell'ambiente rispetto alla stagione di riscaldamento, sono state considerate due settimane, 9-21 dicembre, utilizzando lo stesso intervallo orario d'occupazione della stagione di raffrescamento (8:00-18:00). È da specificare che tra la stagione invernale ed estiva è stata installata la nuova facciata, per questo l'ambiente che viene classificato per questo periodo è da ritenersi differente da quello analizzato precedentemente e quindi non confrontabile.

Per il periodo invernale l'impianto di riscaldamento è attivo, per questo i limiti di temperatura operativa considerati non possono più essere quelli definiti dalla teoria del comfort adattivo, ma è necessario utilizzare i valori standard da normativa (Tabella 02) che definiscono i limiti inferiori per la stagione invernale, basandosi sul tipo di ambiente,

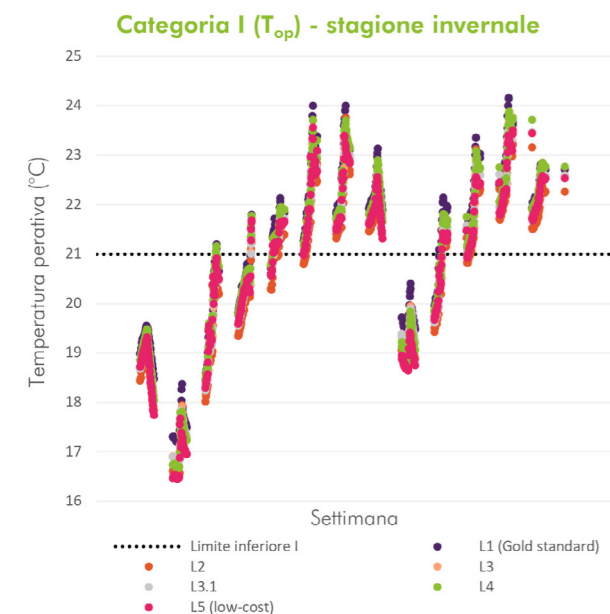


Grafico 46. Valori delle  $T_{op}$  rispetto alla Categoria I per la stagione invernale (9-21 dicembre)

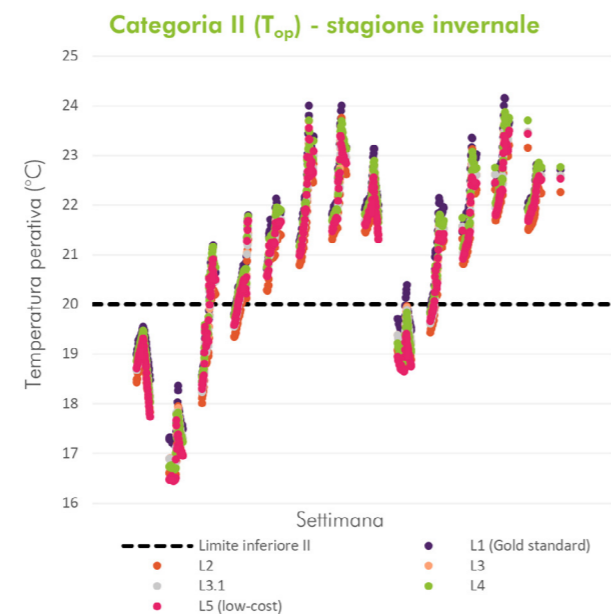


Grafico 47. Valori delle  $T_{op}$  rispetto alla Categoria II per la stagione invernale (9-21 dicembre)

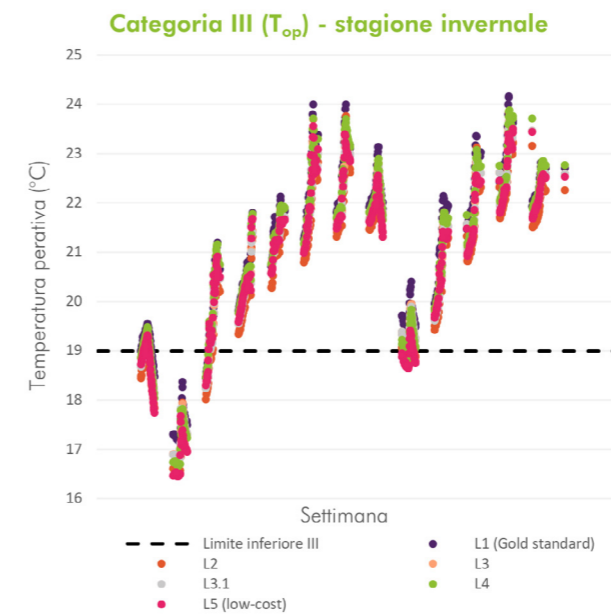


Grafico 48. Valori delle  $T_{op}$  rispetto alla Categoria III per la stagione invernale (9-21 dicembre)

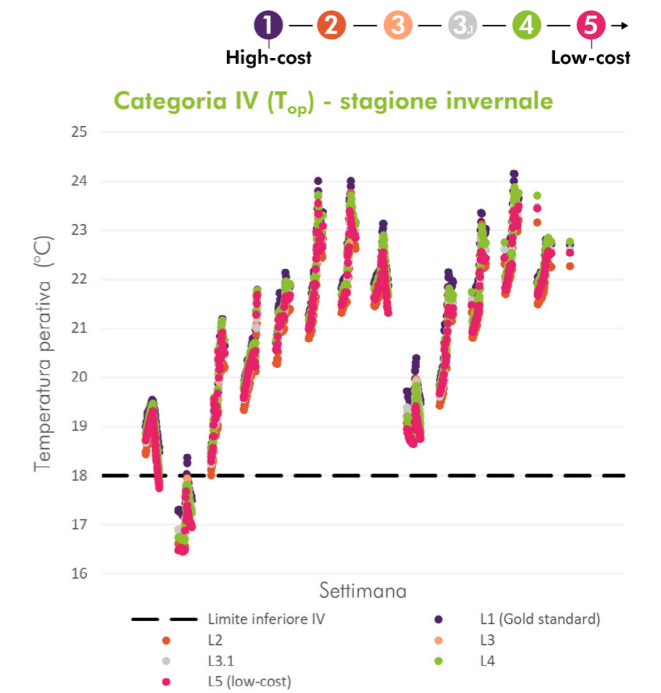


Grafico 49. Valori delle  $T_{op}$  rispetto alla Categoria IV per la stagione invernale (9-21 dicembre)

attività svolta e vestiario dell'occupante. In questo caso le categorie di comfort sono quattro e definiscono dei limiti inferiori per la stagione invernale compresi tra i 21-18°C. Il limite di 20°C, considerato nella Categoria II corrisponde al limite definito dall'ASHRAE per la temperatura dell'aria. Per quanto riguarda la stagione di riscaldamento si possono notare degli scostamenti rispetto ai picchi, di entità minore rispetto alla stagione estiva, per la mancanza di un'importante radiazione solare diretta. Il primo Delta, quello tra il Gold standard e i livelli dal 3 al 3.1, è causato dalle semplificazioni del modello  $R_{sol}$ , il secondo è invece imputabile alle assunzioni definite, nei livelli 4 e 5, in relazione alle temperature superficiali.

Si può constatare, confrontando gli andamenti per i due periodi analizzati, come, escludendo i picchi estivi, l'utilizzo dei livelli porti a rappresentare una qualità ambientale peggiorativa rispetto a quella evidenziata dal Gold standard; per la stagione estiva i valori sono al di sopra, per quella invernale al di sotto, anche se si tratta di un Delta massimo di circa mezzo grado, in alcuni casi potrebbe sottostimare la qualità ambientale. È per questo motivo che gli indici di comfort vengono valutati attraverso dei range e non con un valore unico. Anche per un periodo di due settimane la normativa definisce che almeno il 20% delle ore totali d'occupazione deve rientrare all'interno della categoria per essere definita come rappresentativa del campione. Anche in questo caso il risultato è uguale per tutti i livelli, l'ambiente rientra nella **Categoria I**. Osservando i risultati finali si può evincere che il livello che più si scosta dagli altri risultati è il livello 2 che in realtà dovrebbe essere quello più vicino al Gold standard, questo probabilmente è dovuto al modello che non tiene conto della radiazione solare diffusa.

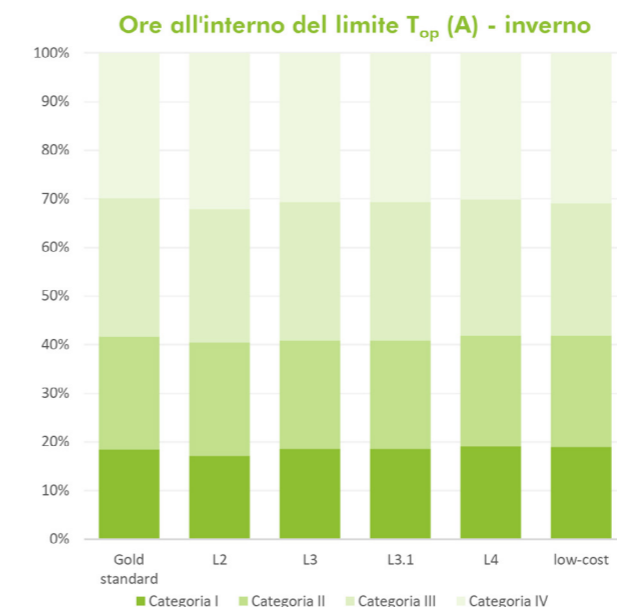


Grafico 50. Categorie secondo il metodo A (16798-2) per la stagione invernale (9-21 dicembre)

Categoria	L1	L2	L3	L3.1	L4	L5	$\Delta_{max}$
I	42%	51%	44%	44%	42%	44%	10%
II	28%	34%	33%	33%	30%	32%	4%
III	11%	22%	14%	14%	15%	19%	8%
IV	7%	9%	8%	8%	8%	8%	1%

Tabella 37. Risultati metodo A per la stagione invernale

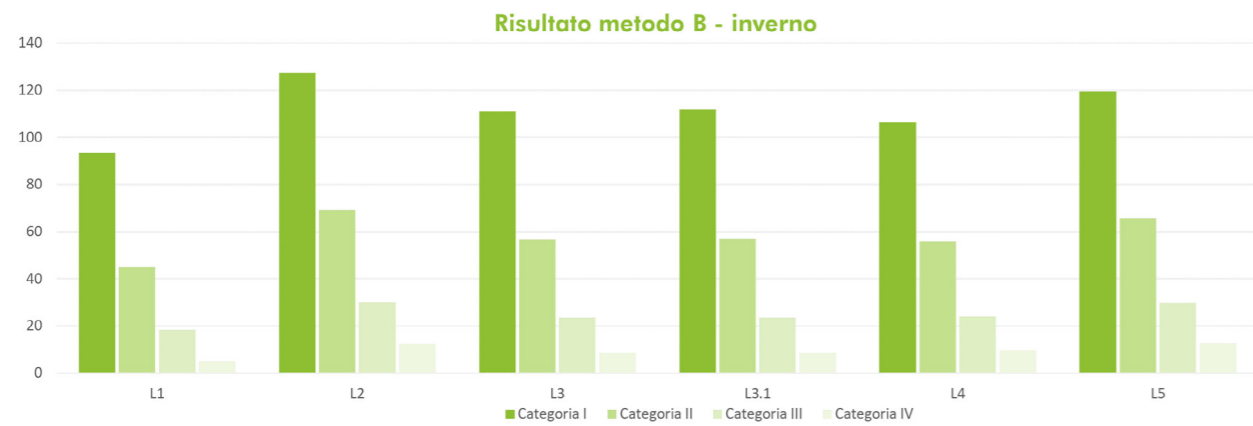


Grafico 51. Risultati metodo B per la stagione invernale (9-21 dicembre)

Grazie ai grafici di dispersione riportati di seguito è possibile valutare un sunto dei risultati ottenuti. I valori di temperatura operativa sono confrontati in funzione dell'*outdoor running mean temperature*. Ogni colonna di valori corrisponde ad una  $\theta_{rm}$  e quindi a un giorno, le misure si riferiscono alle sole ore d'occupazione e si è preferito suddividere le due stagioni per chiarezza rappresentativa. Inoltre, sono definiti i limiti derivanti dal comfort adattivo, anche per la stagione invernale dove risultano essere inferiori a quelli usati per la valutazione (l'ambiente era climatizzato quindi sono stati utilizzati i limiti da Tabella 02). Questa visualizzazione permette anche di osservare le piccole variazioni dovute ai modelli di calcolo, ma allo stesso tempo di constatare come una buona percentuale dei valori si equivalga.

Dai risultati ottenuti per gli indici di temperatura operativa l'ambiente risulta essere in una situazione di elevato comfort termico per l'occupante, e nonostante in alcune situazioni ci sia una netta differenza tra i livelli il quadro rappresentato è lo stesso. I valori di superamento del limite di temperatura operativa presentano un Delta massimo del 10%, che risulta elevato rispetto alle percentuali necessarie per la categorizzazione dell'ambiente (Tabella 05), considerando le semplificazioni effettuate è una differenza comprensibile, ma potrebbe portare ad errori di valutazione. Per questo è necessario esaminare il comportamento anche rispetto agli altri indici di comfort termico.

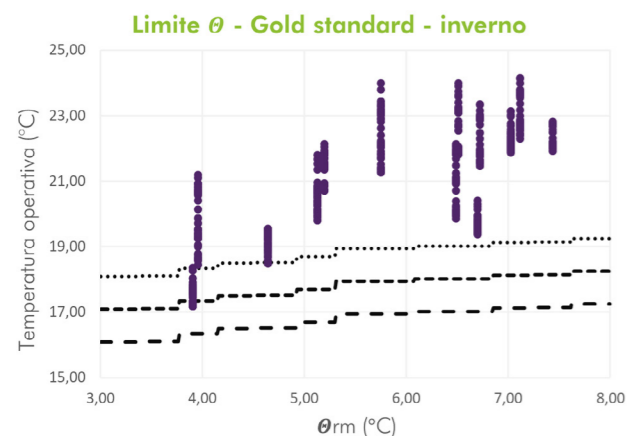


Grafico 52. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in inverno (Livello 1)

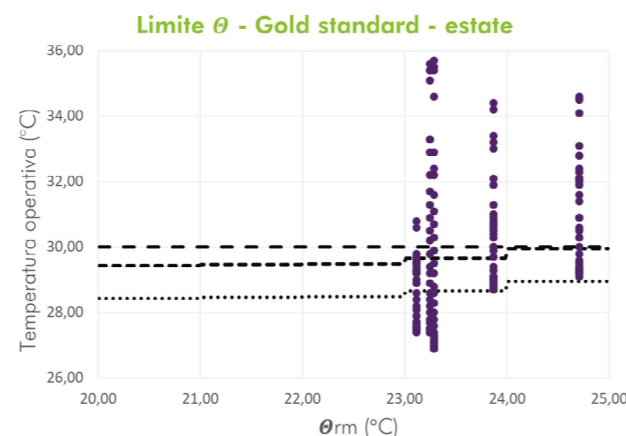


Grafico 53. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in estate (Livello 1)

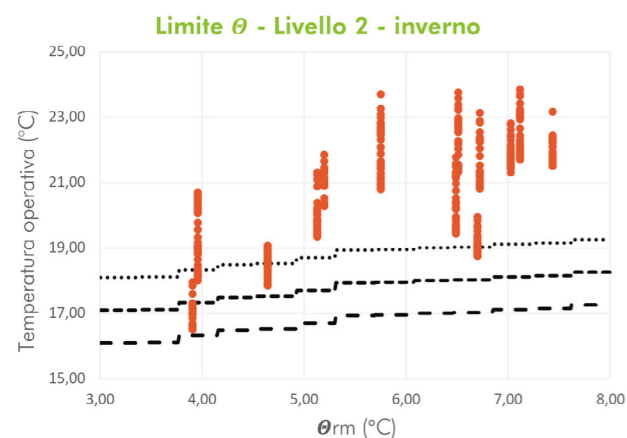


Grafico 54. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in inverno (Livello 2)

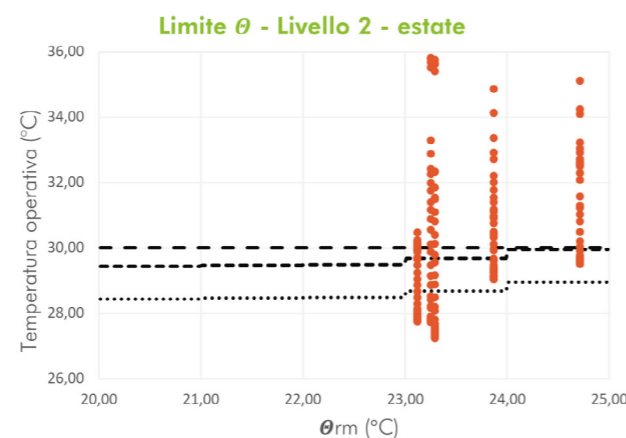


Grafico 55. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in estate (Livello 2)

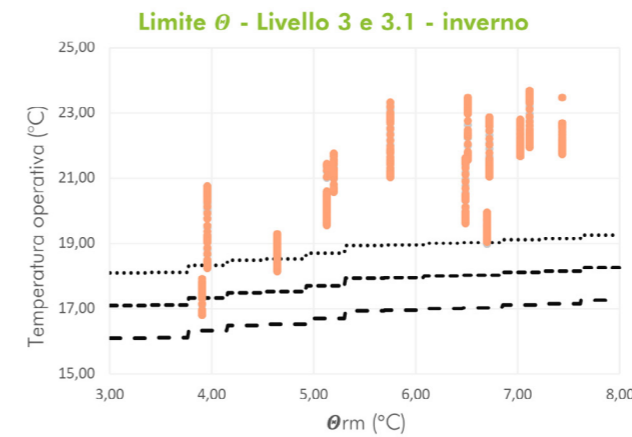


Grafico 56. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in inverno (Livello 3)

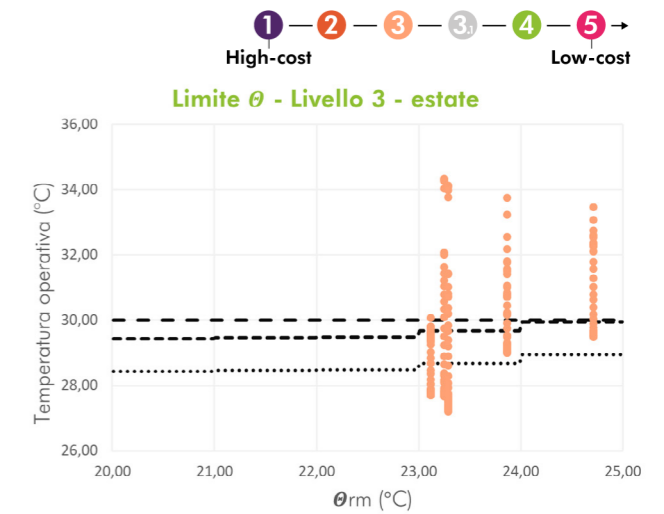


Grafico 57. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in estate (Livello 3)

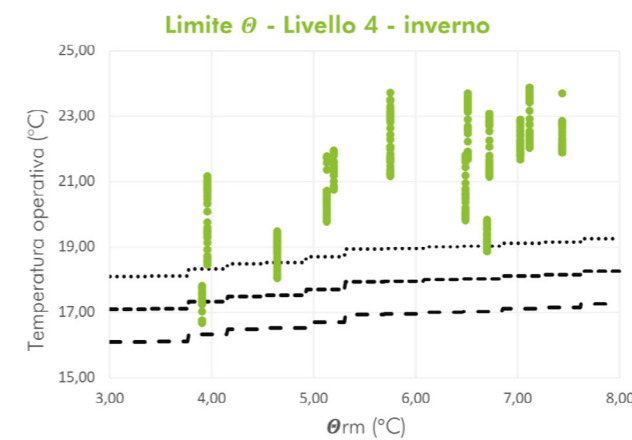


Grafico 58. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in inverno (Livello 4)

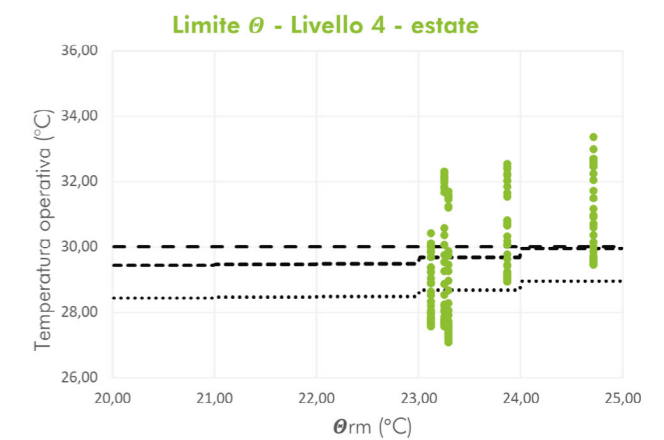


Grafico 59. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in estate (Livello 4)

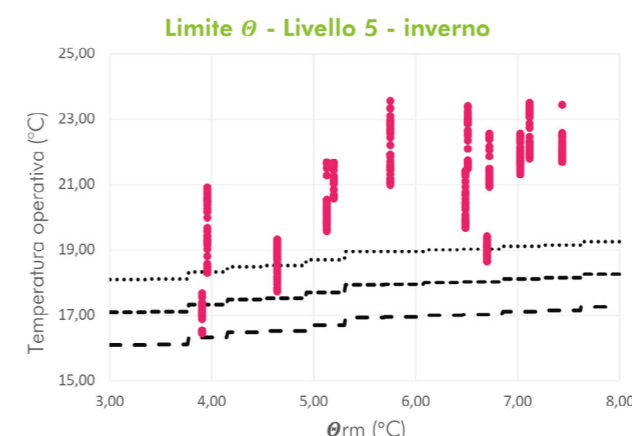


Grafico 60. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in inverno (Livello 5)

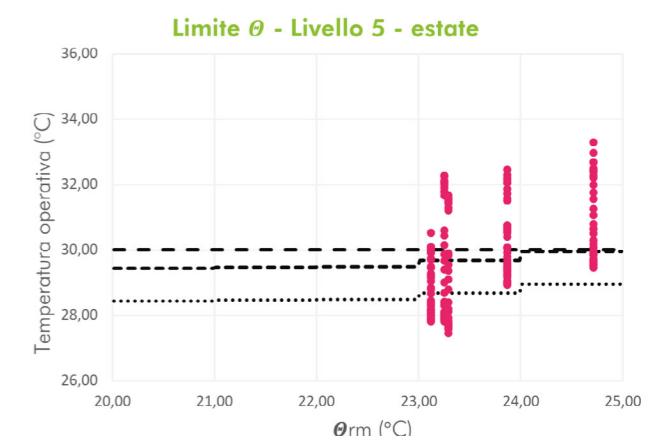


Grafico 61. Dispersione  $T_{op}$  rispetto ai limiti in estate (Livello 5)

## 5c.2. PMV e PPD

Per il calcolo del PMV e del PPD sono state utilizzate le formule descritte a pagina 19, attraverso un modello che eseguisse il calcolo iterativo, necessario per la risoluzione del sistema. Si è deciso di valutare i due indici nello stesso capitolo poiché, a differenza della temperatura operativa, dipendono dagli stessi valori (il PPD viene calcolato attraverso il PMV), per questo le considerazioni possono essere valide per entrambi.

Per la natura della sperimentazione non è stato possibile misurare i dati d'isolamento degli indumenti e di metabolismo dell'occupante, che avrebbero reso la valutazione più affidabile, ma sono stati utilizzati dei valori standard: per il metabolismo è stato ipotizzato circa 1 met, che rappresenta una situazione di riposo, adatta al lavoro d'ufficio; per l'isolamento del vestiario durante la stagione estiva è stato impostato il valore di 1 clo, che identifica un abbigliamento leggero, per la stagione invernale il doppio.

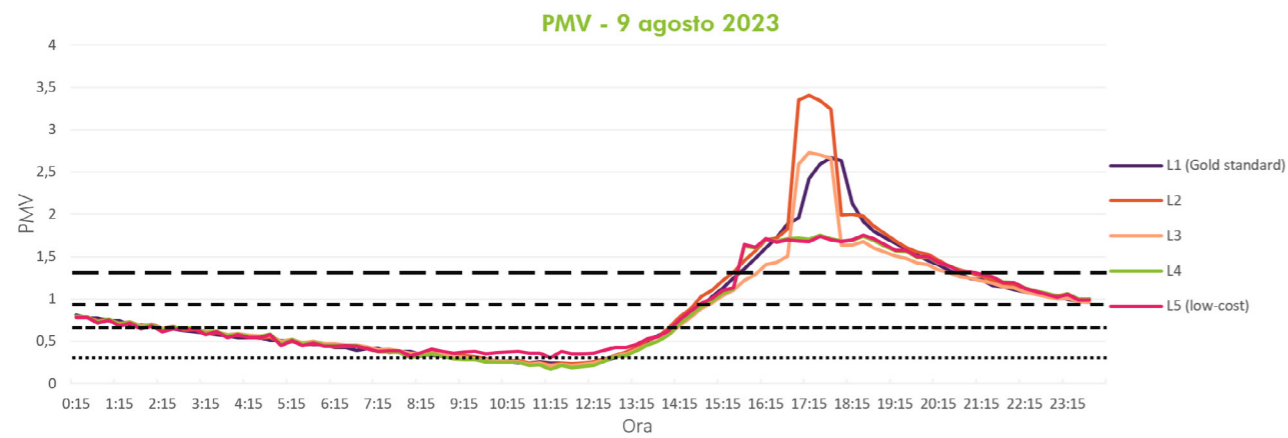


Grafico 62. Modello PMV per la stagione estiva nel giorno soleggiato

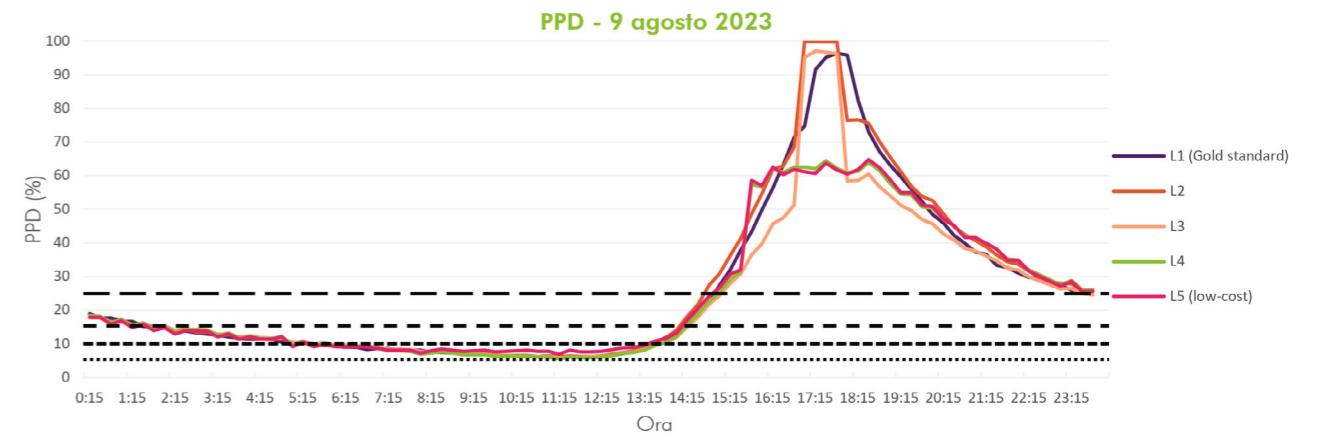


Grafico 66. Modello PPD per la stagione estiva nel giorno soleggiato

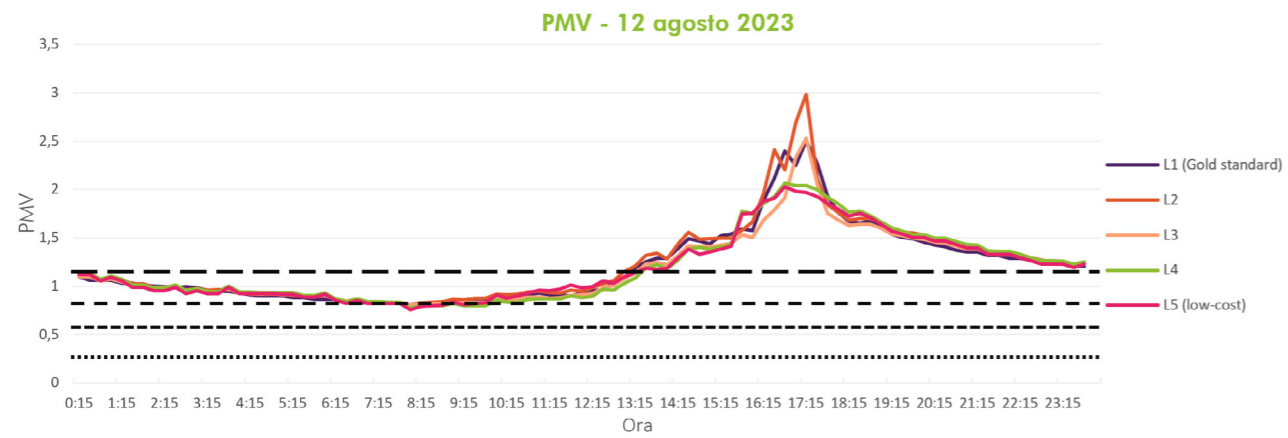


Grafico 63. Modello PMV per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

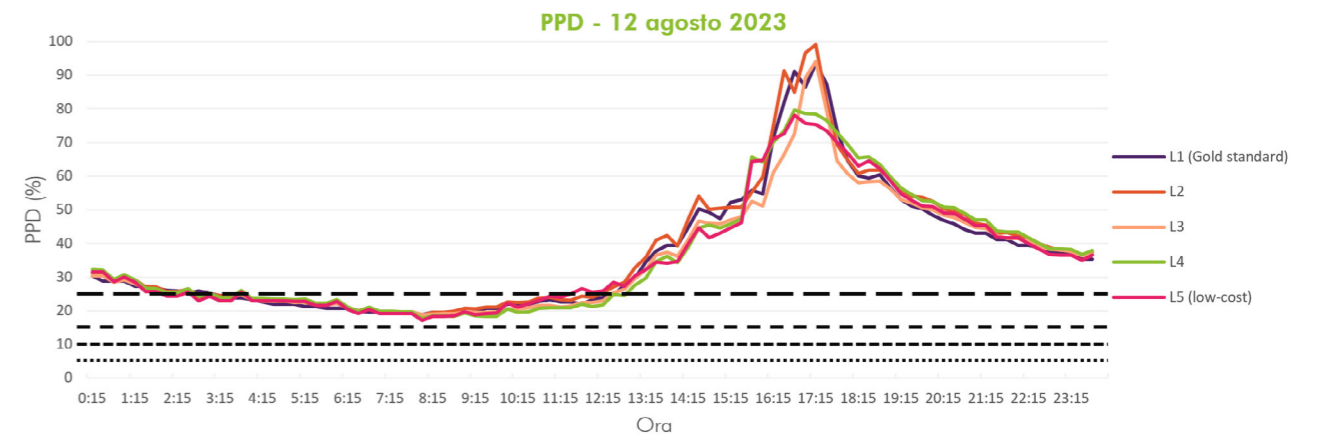


Grafico 67. Modello PPD per la stagione estiva nel giorno nuvoloso

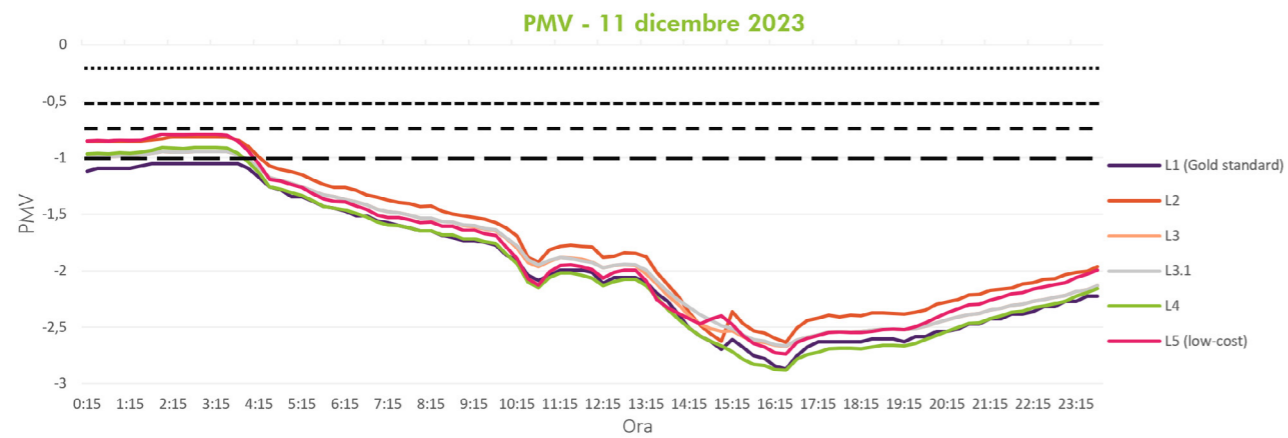


Grafico 64. Modello PMV per la stagione invernale nel giorno soleggiato

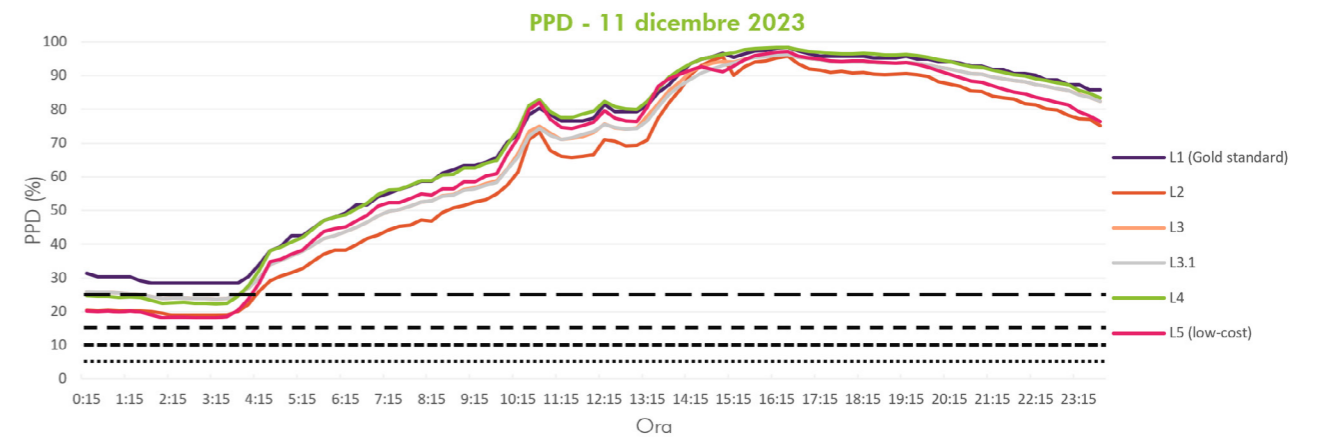


Grafico 68. Modello PPD per la stagione invernale nel giorno soleggiato

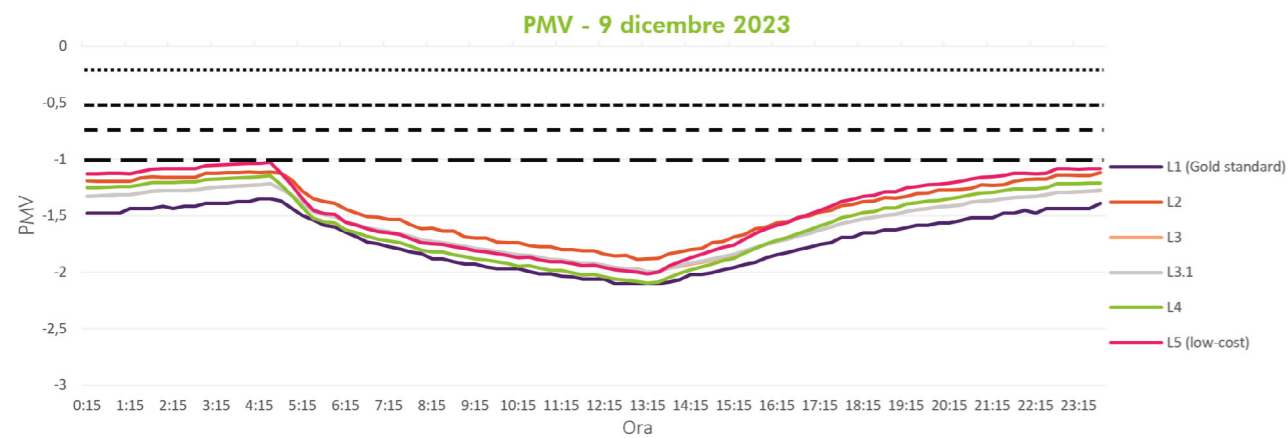


Grafico 65. Modello PMV per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

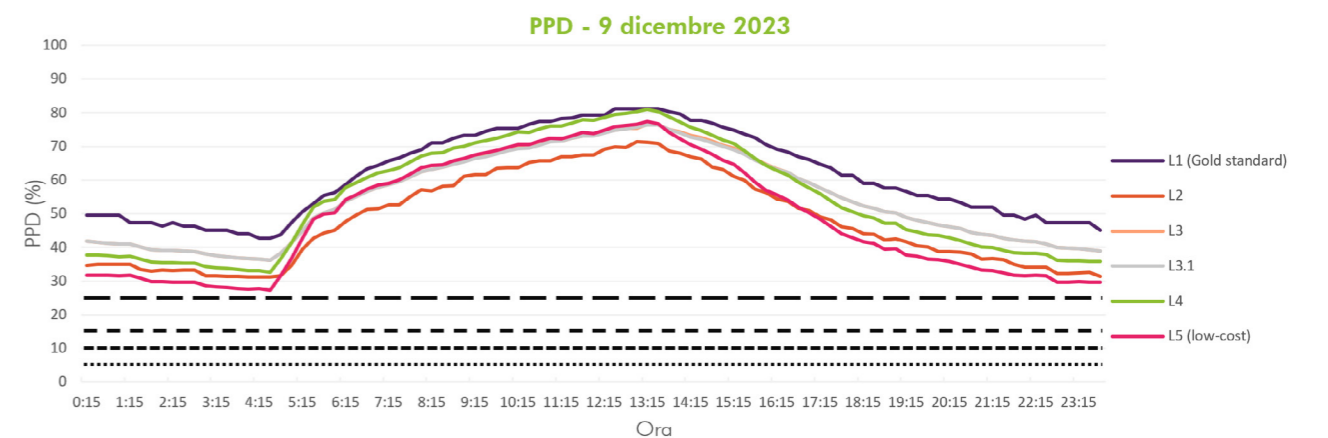


Grafico 69. Modello PPD per la stagione invernale nel giorno nuvoloso

Stagione estiva

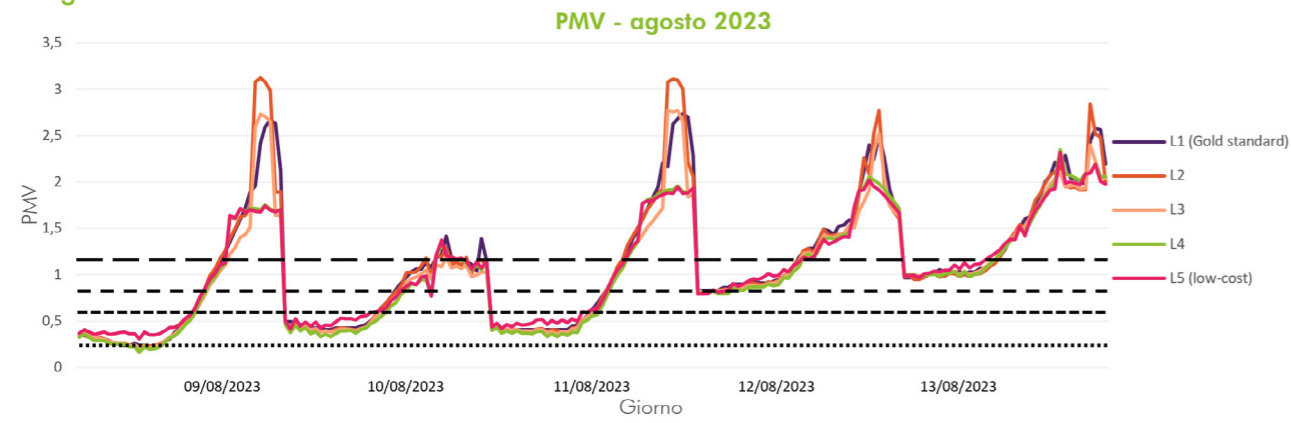


Grafico 70. Modello PMV per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)

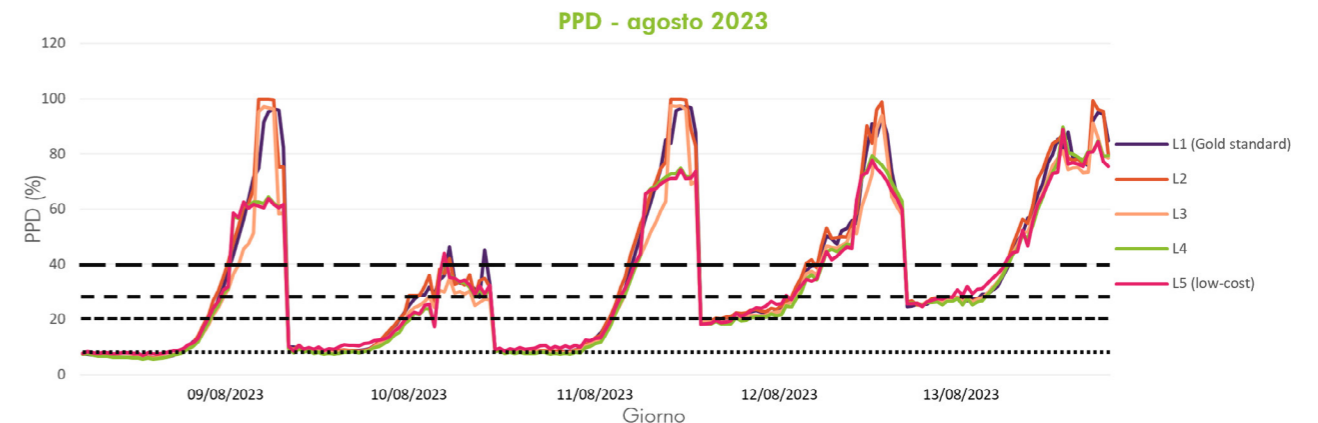
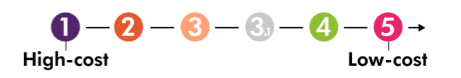


Grafico 75. Modello PPD per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)

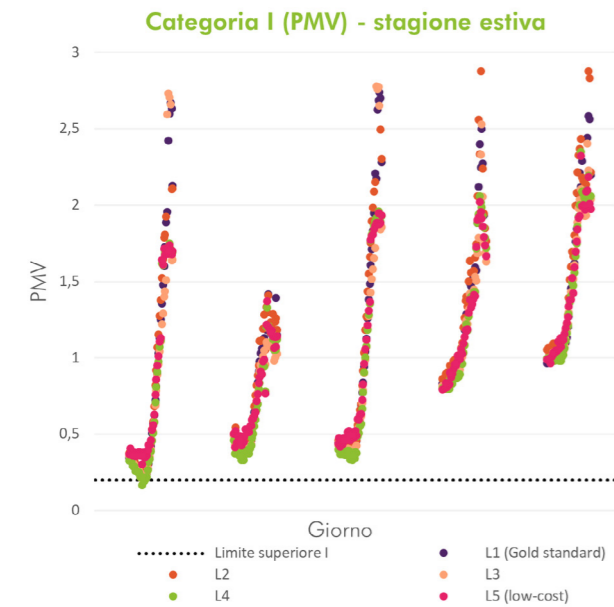


Grafico 71. Valori del PMV rispetto alla Categoria I per la stagione estiva (9-13 agosto)

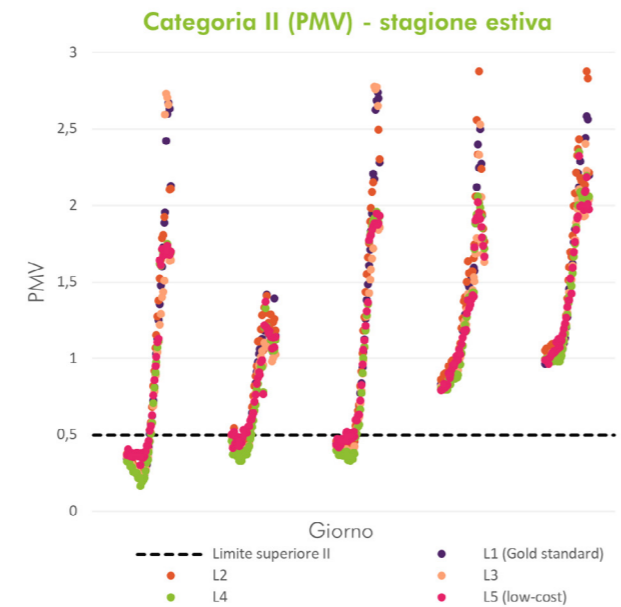


Grafico 72. Valori del PMV rispetto alla Categoria II per la stagione estiva (9-13 agosto)

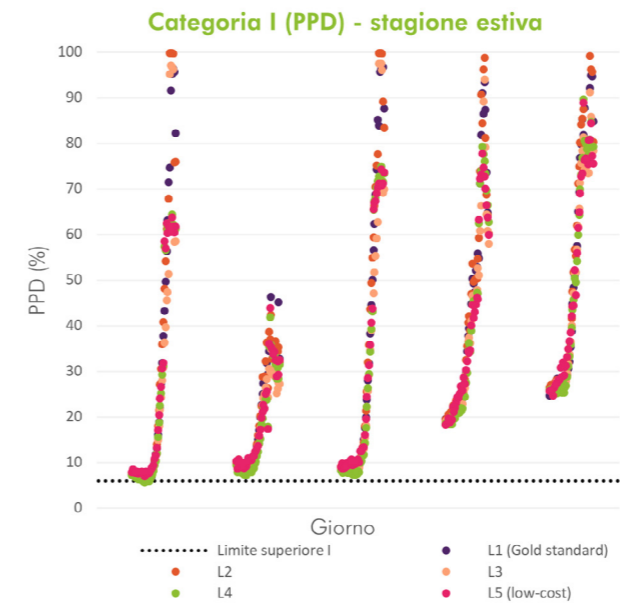


Grafico 76. Valori del PPD rispetto alla Categoria I per la stagione estiva (9-13 agosto)

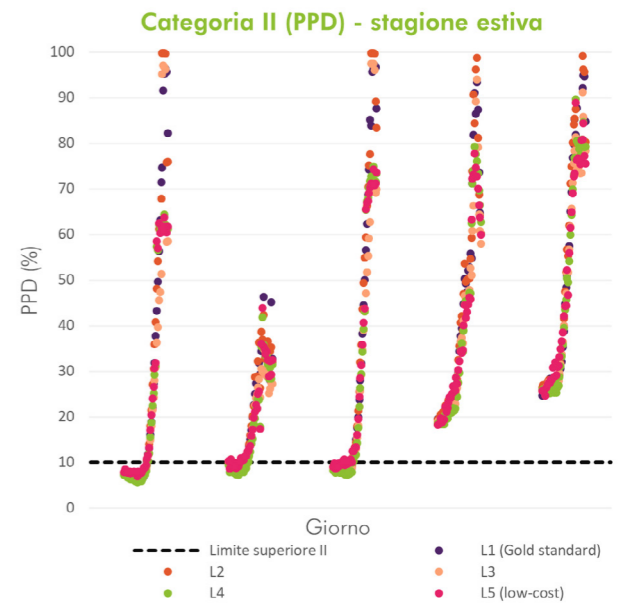


Grafico 77. Valori del PPD rispetto alla Categoria II per la stagione estiva (9-13 agosto)

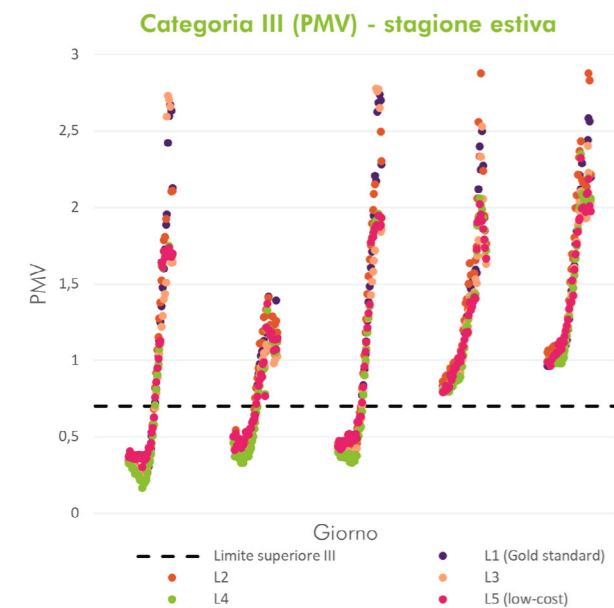


Grafico 73. Valori del PMV rispetto alla Categoria III per la stagione estiva (9-13 agosto)

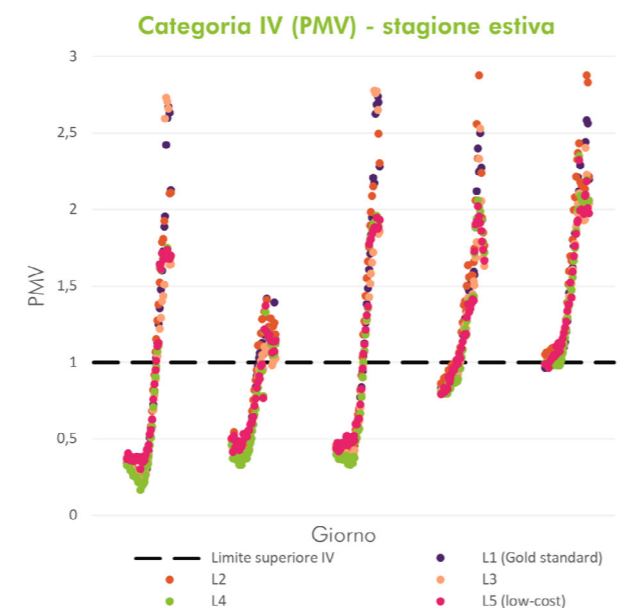


Grafico 74. Valori del PMV rispetto alla Categoria IV per la stagione estiva (9-13 agosto)

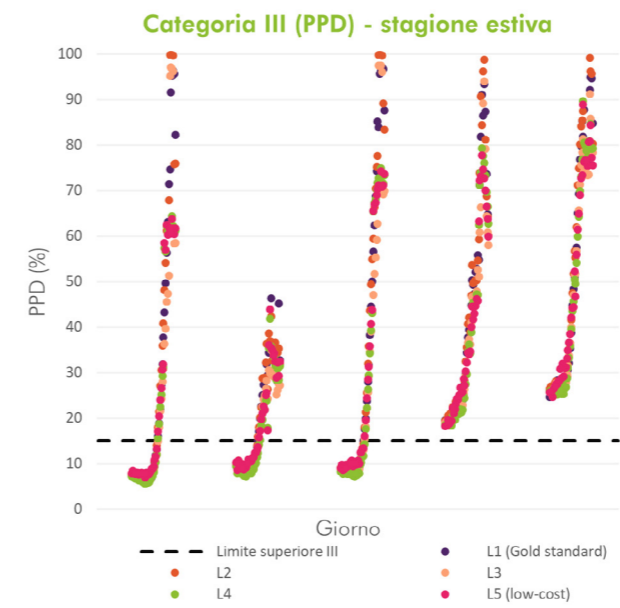


Grafico 78. Valori del PPD rispetto alla Categoria III per la stagione estiva (9-13 agosto)

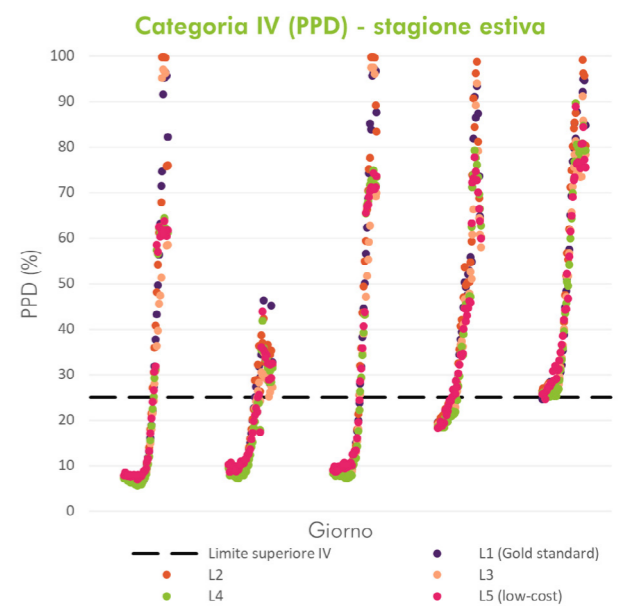


Grafico 79. Valori del PPD rispetto alla Categoria IV per la stagione estiva (9-13 agosto)



Osservando l'andamento dei due indici per i giorni tipo della stagione estiva si può evincere che, a differenza degli altri modelli, il valore di picco coincide. Quindi l'impatto del modello di  $R_{sol}$  si riduce ulteriormente, andando a influenzare solo l'andamento della salita. Si può invece notare uno scostamento maggiore tra il livello 5 e il *Gold standard*, dovuto probabilmente al trattamento della temperatura media radiante. Nel lungo termine lo scostamento dovuto alla  $T_{mr}$  è maggiore nei giorni in cui le temperature sono più basse, questo potrebbe significare che i modelli per il calcolo della temperatura superficiale funzionano meglio ad alte temperature.

Per la categorizzazione dello spazio sono stati utilizzati i valori da normativa descritti nella tabella 03, che definisce dei range per il PMV e dei limiti per PPD. Per il PMV nella stagione di raffrescamento vengono considerati solamente i valori positivi, che rappresentano una situazione di surriscaldamento, per il PPD i limiti rimangono invariati tra estate e inverno.

Sul lungo termine si può notare come la maggior parte dei valori sia al di fuori dei limiti di comfort. Questo viene confermato da calcolo degli indici. Attraverso la percentuale di ore di superamento di PMV (metodo A) la prima categoria è completamente esclusa; per tutte le ore d'occupazione l'indice non rientra nella Categoria I, solo per il livello 4 un 2% è all'interno del limite. Per il resto delle categorie i risultati dei livelli sono abbastanza stabili e tenendo con-

### Stagione invernale

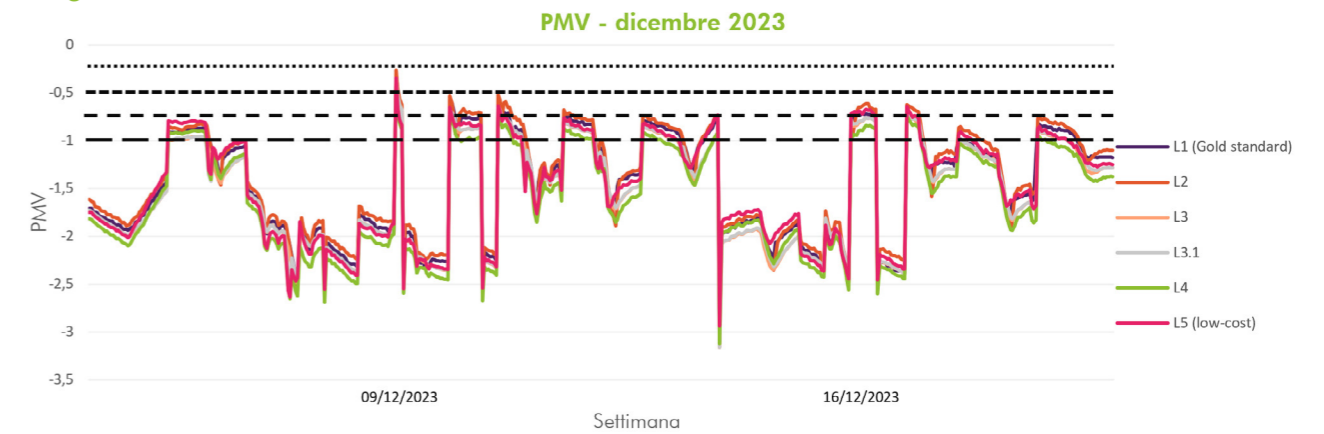


Grafico 82. Modello PMV per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-21 dicembre)

### Ore all'interno del limite di PMV - estate

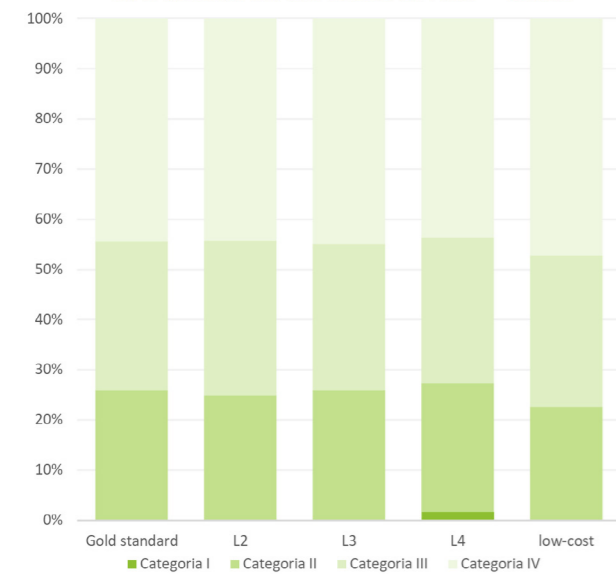


Grafico 80. Categorie di PMV per la stagione estiva (9-13 agosto)

### Media PPD

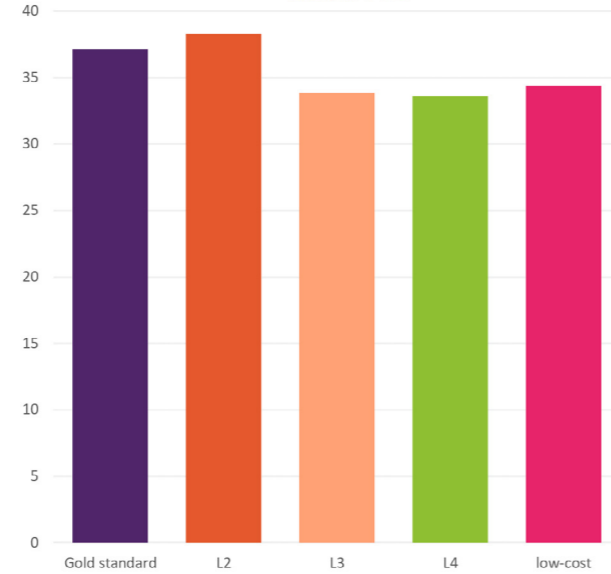


Grafico 81. Medie di PPD per la stagione estiva (9-13 agosto)

Ore di superamento del limite di PMV - stagione estiva						
Categoria	L1	L2	L3	L4	L5	$\Delta$ max
I	100%	100%	100%	98%	100%	2%
II	75%	75%	73%	71%	78%	4%
III	71%	71%	69%	67%	71%	4%
IV	56%	58%	53%	51%	55%	7%

Tabella 38. Risultati indice PMV per la stagione estiva (9-13 agosto)

to, come per la temperatura operativa, un minimo di ore del 20% sul totale, l'ambiente risulta essere in **Categoria II**.

Per quanto riguarda il PPD considerando la media la percentuale di insoddisfatti è molto alta e non rientra nel limite massimo del 25%, anche se analizzando i singoli valori una parte si trova al di sotto del limite. Un'altra considerazione importante è che tutti i livelli si distanziano di circa il 5% dal PPD del *Gold standard*, lo scostamento però è meno importante per i valori di PMV.

Per questioni di tempistiche non è stato possibile utilizzare anche il metodo C, che pesa il PMV attraverso il PPD. Rispetto alle sostanziali differenze riscontrate sarebbe interessante in futuro aggiungere questo ulteriore parametro per la valutazione dei livelli.

### Categoria I (PMV) - stagione invernale

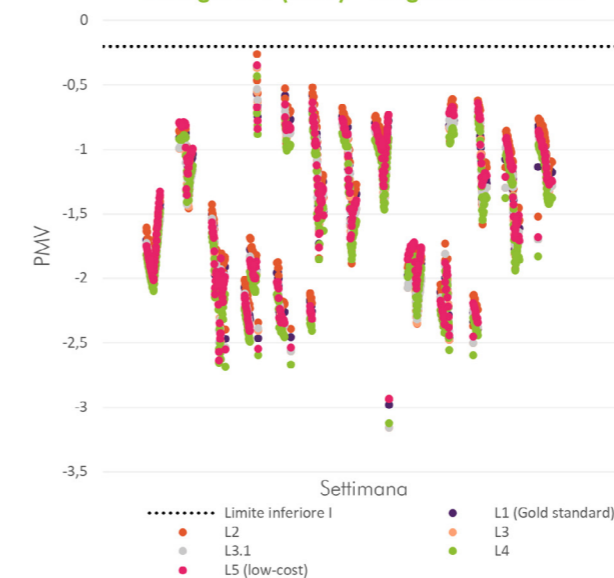


Grafico 83. Valori del PMV rispetto alla Categoria I per la stagione invernale (9-21 dicembre)

### Categoria II (PMV) - stagione invernale

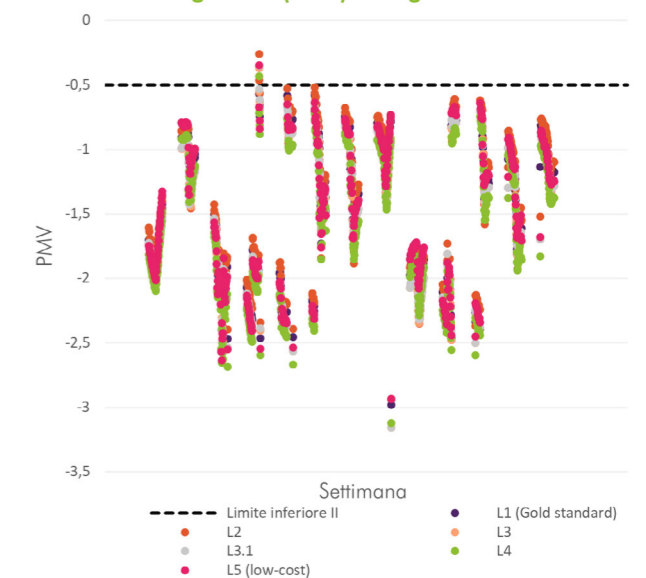


Grafico 84. Valori del PMV rispetto alla Categoria II per la stagione invernale (9-21 dicembre)

### Categoria III (PMV) - stagione invernale

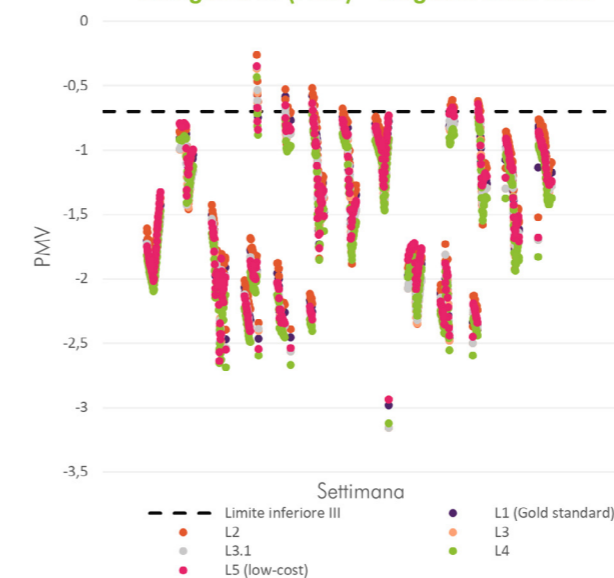


Grafico 85. Valori del PMV rispetto alla Categoria III per la stagione invernale (9-21 dicembre)

### Categoria IV (PMV) - stagione invernale

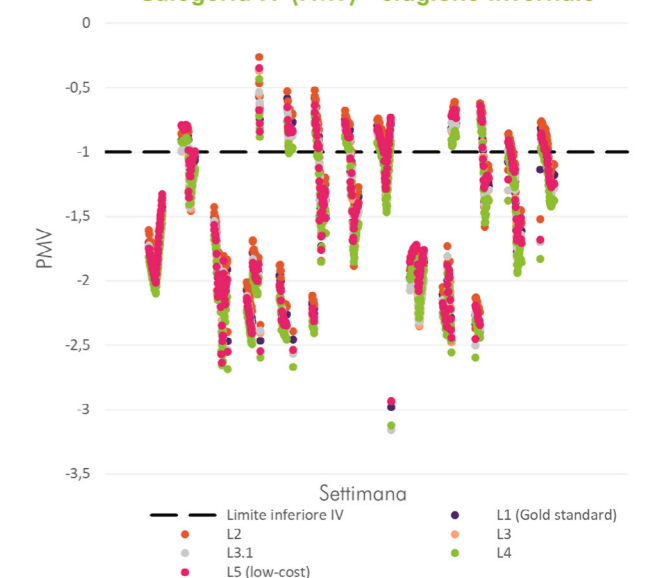


Grafico 86. Valori del PMV rispetto alla Categoria IV per la stagione invernale (9-21 dicembre)

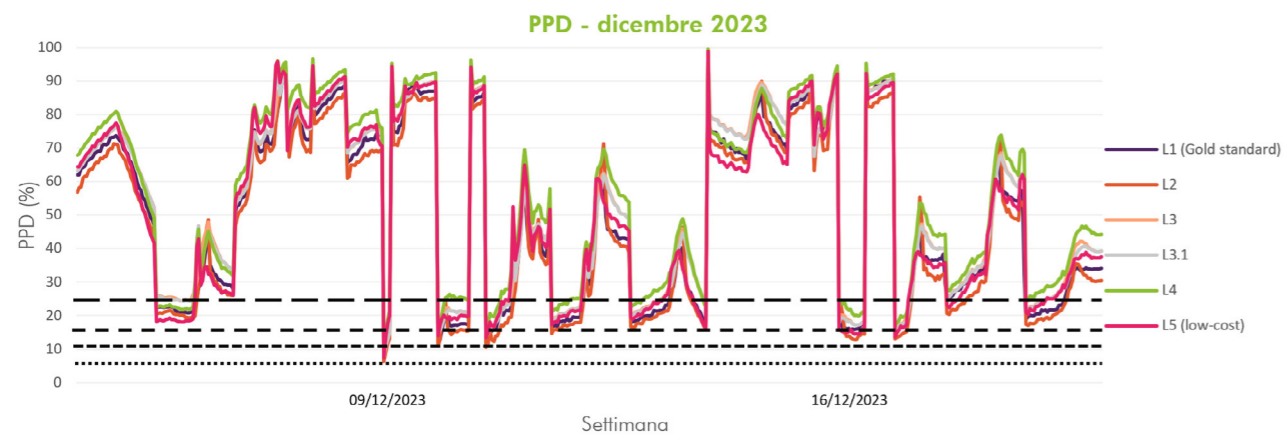


Grafico 87. Modello PPD per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-21 dicembre)

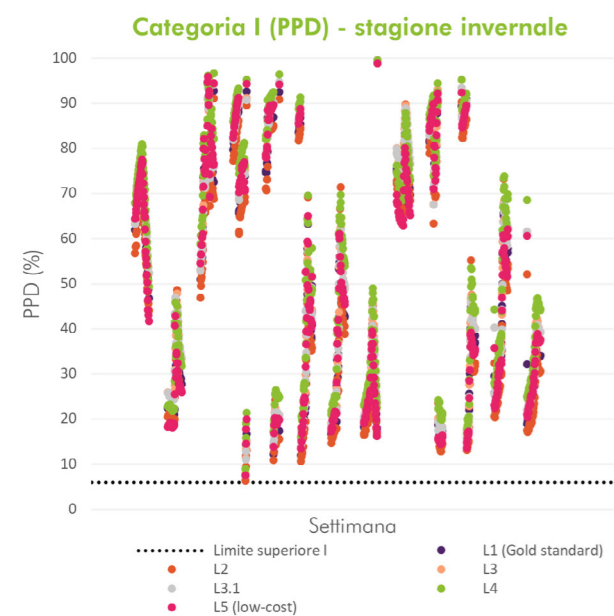


Grafico 88. Valori del PPD rispetto alla Categoria I per la stagione invernale (9-21 dicembre)

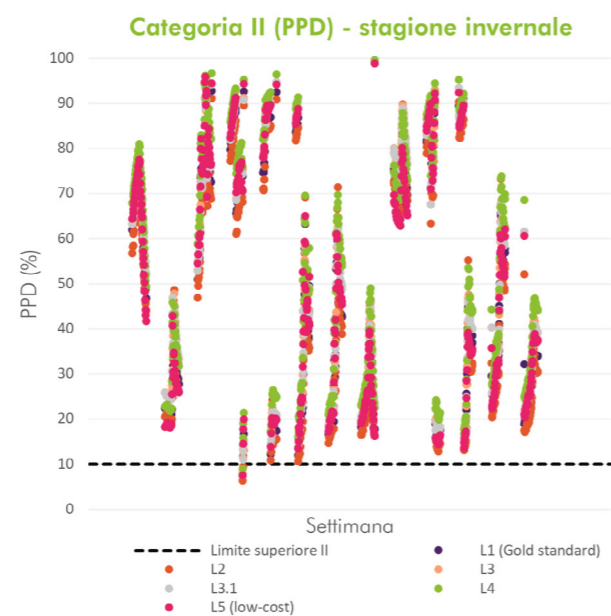


Grafico 89. Valori del PPD rispetto alla Categoria II per la stagione invernale (9-21 dicembre)

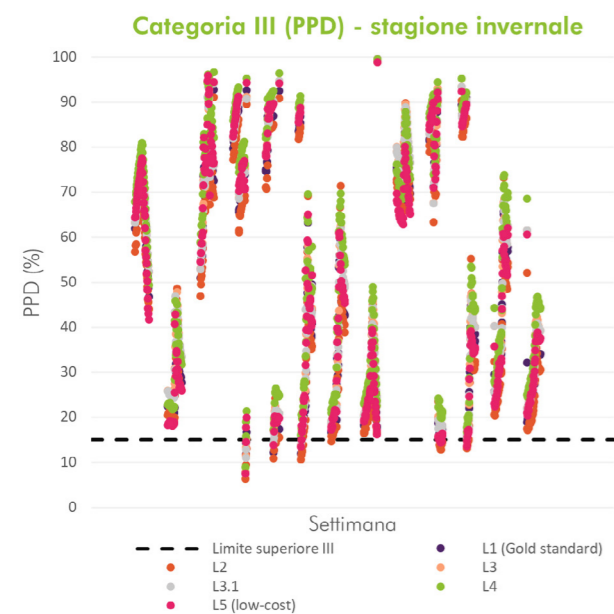


Grafico 90. Valori del PPD rispetto alla Categoria III per la stagione invernale (9-21 dicembre)

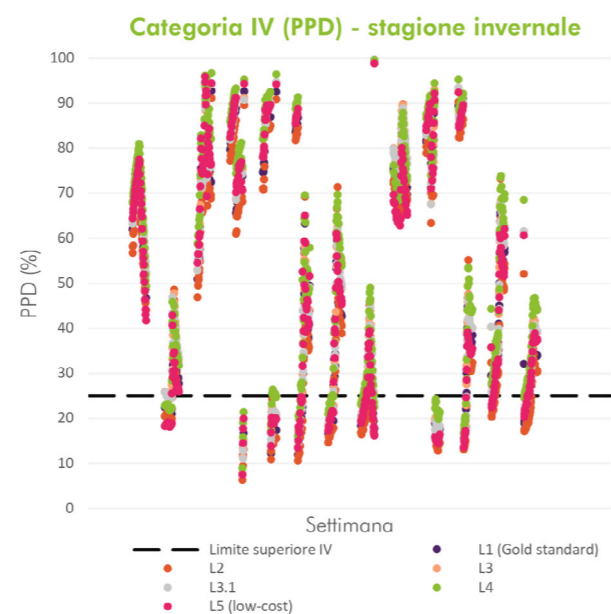


Grafico 91. Valori del PPD rispetto alla Categoria IV per la stagione invernale (9-21 dicembre)

1 — 2 — 3 — 3 — 4 — 5 →  
High-cost Low-cost

Per la stagione di riscaldamento si può constatare una situazione leggermente differente, da imputare in parte al funzionamento del modello PMV, che a causa dell'impostazione di un valore di  $I_{cl}$  più alto ha riscontrato delle problematiche con il calcolo iterativo, che hanno portato a una maggiore differenziazione tra i risultati dei modelli.

Analizzando i due giorni tipo, si evince che gli scostamenti non si trovano più solo nei picchi ma anche nelle ore finali e iniziati della giornata. I livelli dal 2 al 4 mantengono un andamento costante tra loro, mentre il livello 5 risulta essere due volte più distante dal Gold standard. Come detto anche per stagione estiva, questo Delta, è dovuto probabilmente alle assunzioni fatte sulle temperature superficiali e al funzionamento dei modelli usati per il loro calcolo.

Analizzando il comportamento sul lungo periodo si può notare come l'andamento risulti meno uniforme rispetto a quello della temperatura operativa, che aumenta o diminuisce gradualmente riproponendo l'andamento della temperatura interna, mentre il PMV, e conseguentemente il PPD, rappresentano un voto rispetto alla qualità ambientale e quindi possono diminuire o aumentare con una velocità maggiore.

Anche per la stagione invernale i valori che rientrano nei limiti sono pochi, considerando che si tratta di un periodo di due settimane. Nessuno dei valori si trova nelle prime due categorie e una minima parte nella terza e nell'ultima,

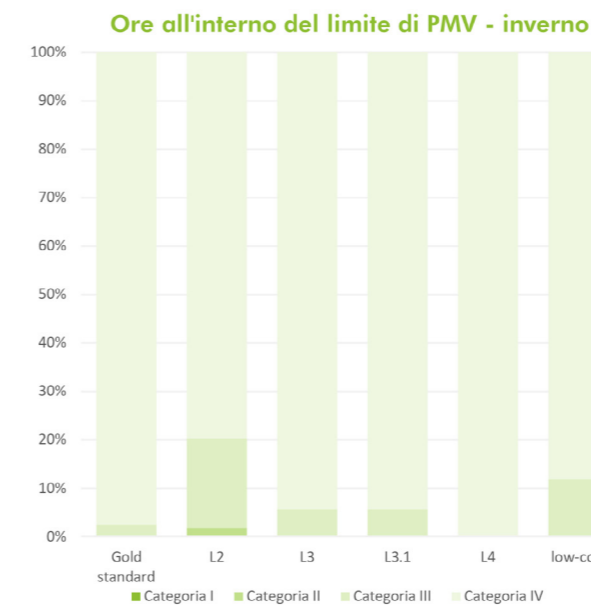


Grafico 92. Categorie di PMV per la stagione invernale

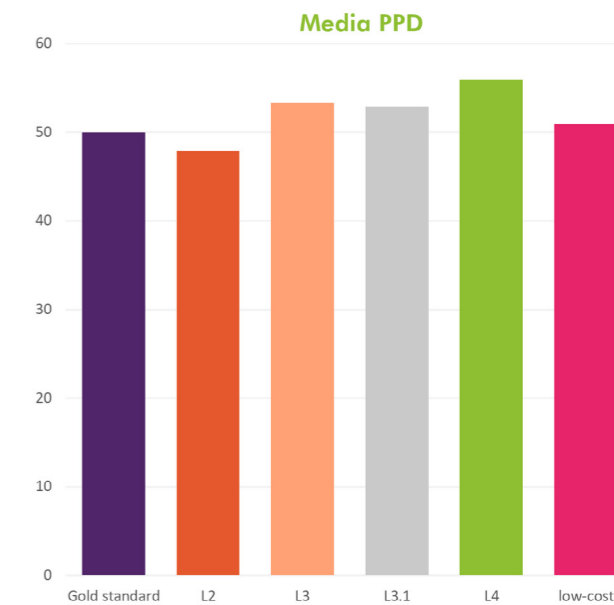


Grafico 93. Medie di PPD per la stagione invernale

Ore di superamento del limite di PMV - stagione invernale

Categoria	L1	L2	L3	L3.1	L4	L5	$\Delta_{max}$
I	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%
II	100%	99%	100%	100%	100%	100%	1%
III	99%	93%	99%	99%	100%	97%	6%
IV	74%	70%	77%	77%	82%	74%	8%

Tabella 39. Risultati indice PMV per la stagione invernale

l'ambiente viene identificato nella **Categoria IV**. Per i valori di media di PPD ci ritroviamo in una situazione di scostamento tra i diversi livelli, come per la stagione estiva.

In conclusione, è constatabile come gli indici di  $T_{op}$  e di PMV valutino la qualità ambientale in modo molto differente:

- $T_{op}$  => stagione estiva = stagione invernale = Categoria I
- PMV => stagione estiva = Categoria II; stagione invernale = Categoria IV

Da questo si comprende come sia molto importante il tipo di indice utilizzato per la valutazione. Esistono molti studi al riguardo, come quello già citato di Li P. et al. (2020), che cercano di confrontare il comportamento dei diversi indici rispetto a quelle che risultano essere le vere percezioni dell'occupante, cercando anche d'introdurre nuovi indici più veritieri; anche il *living-lab* dove è stata effettuata la sperimentazione potrebbe diventare un valido contributo alla ricerca su questo argomento.

Valutando quello che è il vero scopo di questa sperimentazione, nonostante tutte le differenze descritte rispetto al comportamento dei 5 livelli nei confronti del Gold standard, tutti portano alla stessa categorizzazione della qualità

ambientale. Quindi il risultato più importante è che grazie al lavoro di postproduzione dei dati è possibile partire da una strumentazione *low-cost* e arrivare agli stessi risultati monitorati da una strumentazione intrusiva e molto costosa. Questa affermazione al momento è valida riferendosi a una valutazione sul lungo termine perché, come si evince dalle analisi, sul breve termine è sicuramente richiesta un'accuratezza maggiore alla quale al momento non è stato possibile arrivare per cause come: l'utilizzo di Excel come software di calcolo o la scelta dei database. Per il futuro l'implementazione di questi aspetti potrebbe portare a un miglioramento del risultato e della risoluzione dei modelli.

### 5c.3. UDI e DA

Per valutare la qualità ambientale indoor dell'ufficio rispetto agli altri dati disponibili, si è pensato di aggiungere una valutazione rispetto al comfort visivo dovuto alla luce naturale. Purtroppo, come già anticipato nel capitolo 5a.5. non è stato possibile procedere allo stesso modo per quanto riguarda la qualità dell'aria per la mancanza dati riguardanti la concentrazione di CO<sub>2</sub> esterna, necessaria per valutare quella interna.

Come descritto nella tabella 07, i due indici indicano:

- UDI => la percentuale di tempo d'occupazione in cui l'illuminamento sul piano di lavoro orizzontale rientra in un intervallo di 100-3000 lux;
- DA => la percentuale di tempo d'occupazione in cui l'illuminamento sul piano di lavoro orizzontale supera i 500 lux (illuminamento minimo per il lavoro d'ufficio secondo la EN 12464-1).

Questi indici vengono poi suddivisi in range per avere una valutazione più approfondita, inoltre per definire l'indice sul lungo termine è necessario un rispetto dei requisiti d'illuminamento almeno per 50% delle ore d'occupazione.

Rispetto alle considerazioni fatte nel capitolo 5a.3. si opta per l'utilizzo del luxmetro della Gigahertz-Optik serie X-2000, che risulta essere il più accurato. Attraverso questa valutazione è possibile avere una qualificazione dell'illuminamento in ambiente per la stagione estiva, rispetto alla facciata dello stato di fatto iniziale, e per la stagione invernale, rispetto alla nuova tecnologia che si intende testare nel *living-lab*. Grazie alla disponibilità dei dati raccolti, entrambi i periodi vengono valutati rispetto a quattro settimane.

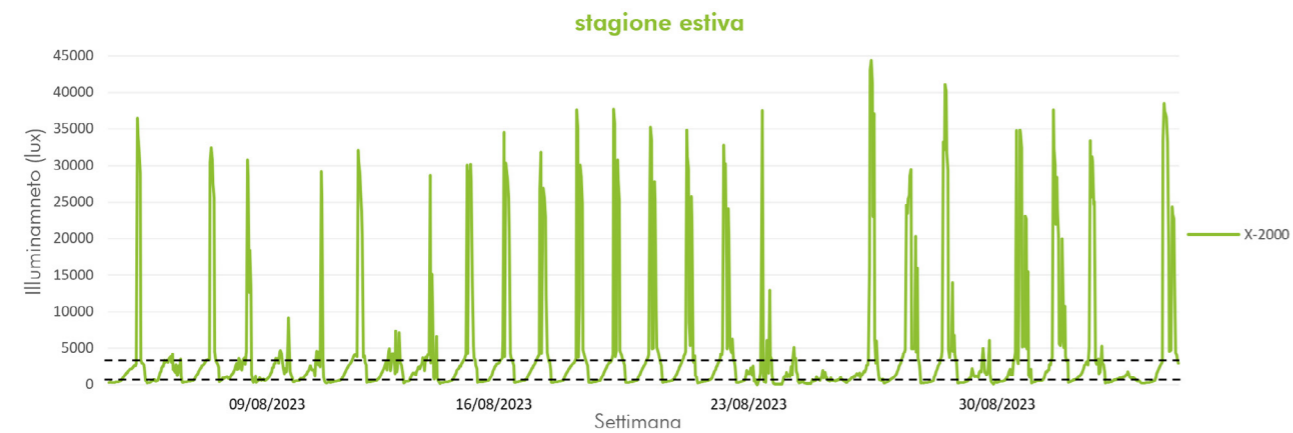


Grafico 94. Illuminamento orizzontale sul piano di lavoro per il periodo estivo (9 agosto-6 settembre)

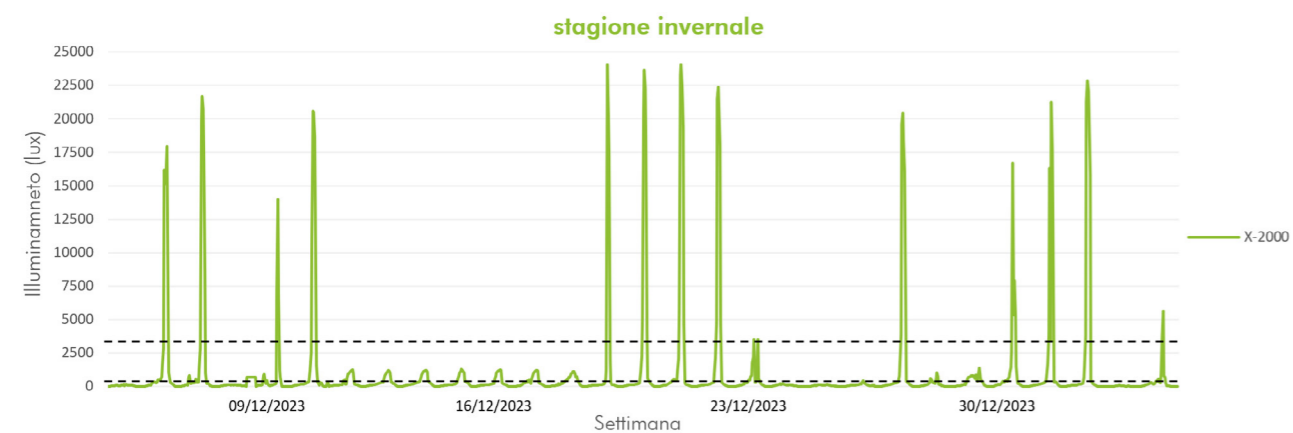


Grafico 95. Illuminamento orizzontale sul piano di lavoro per il periodo invernale (9 dicembre-6 gennaio)

Le categorie di UDI cercano di caratterizzare l'ambiente rispetto ai diversi range d'illuminamento riscontrabili:

- UDI<sub>100</sub> => E<sub>o</sub> < 100 lx
- UDI<sub>100-300</sub> => 100 lx < E<sub>o</sub> < 300 lx
- UDI<sub>300-500</sub> => 300 lx < E<sub>o</sub> < 500 lx
- UDI<sub>500-3000</sub> => 500 lx < E<sub>o</sub> < 3000 lx
- UDI<sub>3000</sub> => E<sub>o</sub> > 3000 lx

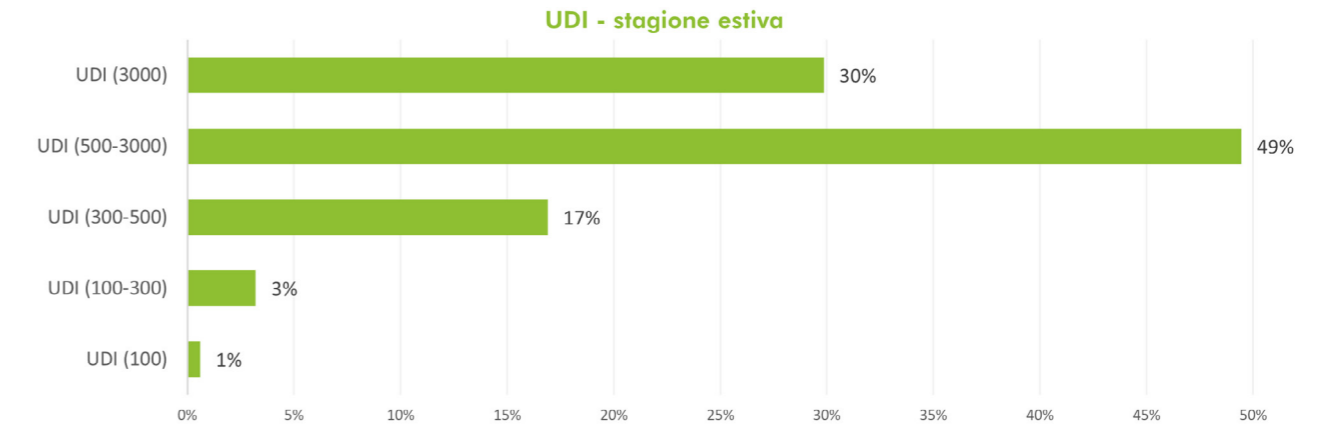


Grafico 96. UDI per il periodo estivo (9 agosto-6 settembre)

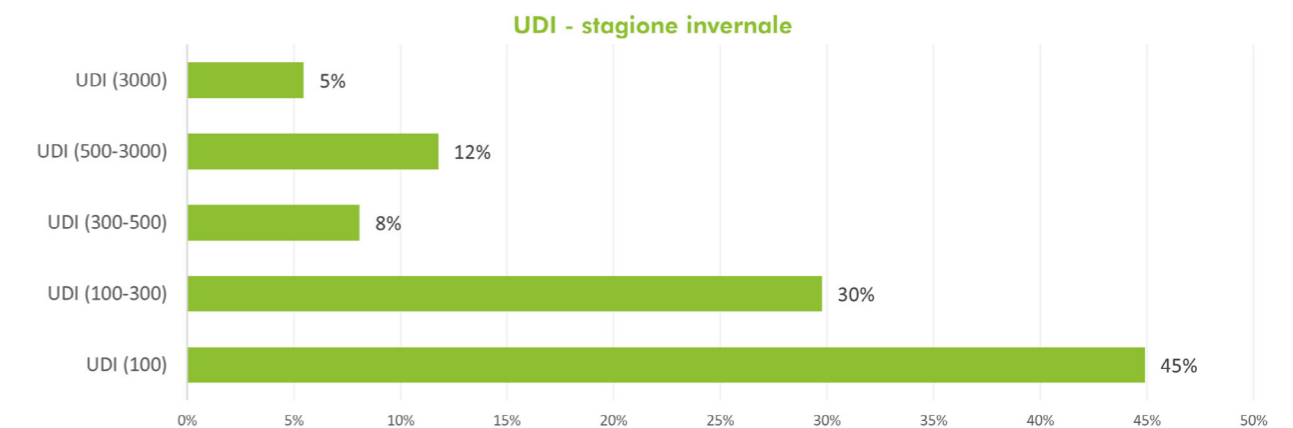


Grafico 97. UDI per il periodo invernale (9 dicembre-6 gennaio)

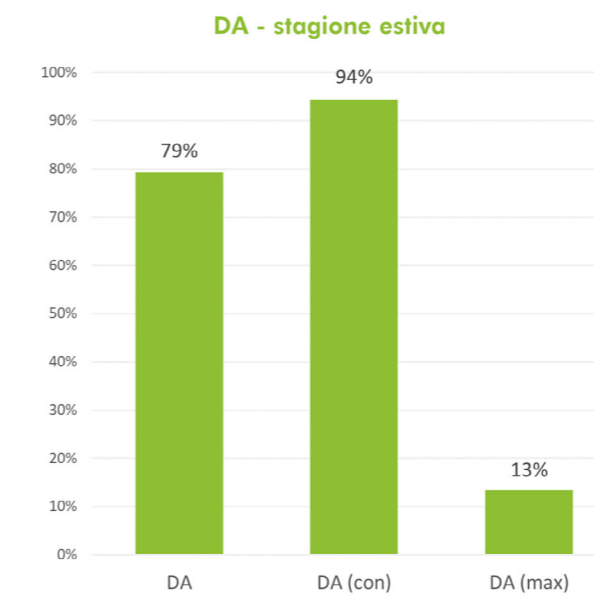


Grafico 98. DA per il periodo estivo (9 agosto-6 settembre)

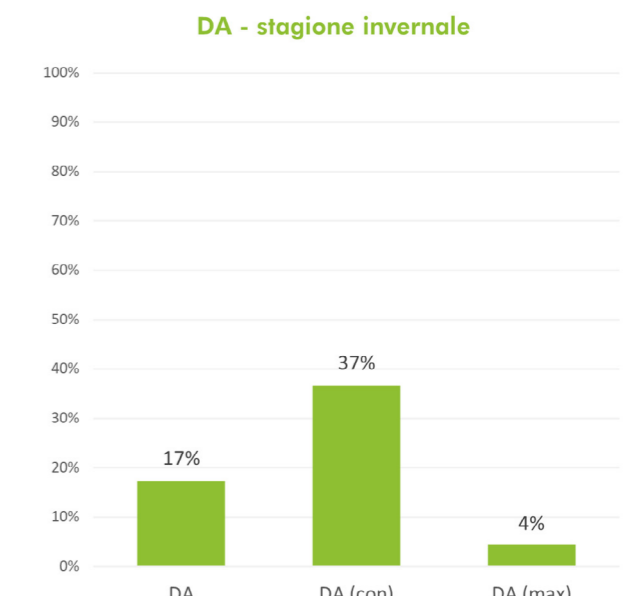


Grafico 99. DA per il periodo invernale (9 dicembre-6 gennaio)

Mentre il DA utilizza un unico limite su quale definisce tre categorie:

- DA =>  $E_o > 500 \text{ lx}$
- DAcon =>  $E_o > 500 \text{ lx}$  (se  $E_o < 500 \text{ lx}$  =>  $wf = E_o/500 \text{ lx}$ )
- DA =>  $E_o > 5000 \text{ lx}$

Valutando l'ambiente rispetto allo UDI è da considerare che l'indice completo è quello che considera un illuminamento che va dai 100 lux ai 3000 lux, cioè la somma dello UDI100-300, UDI300-500 e UDI500-3000. Per la stagione estiva la percentuale di tempo totale in cui l'illuminamento è all'interno del range è del 69%, quindi la percentuale minima da normativa (50 % del tempo d'occupazione) è rispettata e ci troviamo in una situazione accettabile. Anche nella stagione invernale lo UDI è al limite dell'accettabilità, infatti, la percentuale totale di tempo è del 50%; considerando che la tecnologia di facciata installata prima del periodo invernale riduce notevolmente la superficie vetrata e la trasmissione solare entrante, e che il sensore in inverno è stato posizionato più internamente, si tratta di un ottimo risultato. Valutando invece i risultati del DA, in estate i valori sono accettabili mentre in inverno no.

Questo tipo di valutazioni sull'illuminamento solitamente vengono effettuate attraverso software che riescono a implementare i risultati con delle considerazioni spaziali, calcolando gli indici su una griglia di punti e definendo l'accettabilità o meno anche rispetto alla percentuale di spazio che rientra nei requisiti. Per questo le considerazioni appena effettuate sull'illuminamento diurno non sono esaustive, ma potrebbero essere ampliate in futuro, cercando di analizzare il comportamento degli indici rispetto, ad esempio, al posizionamento del sensore o all'utilizzo di sensori meno accurati. Per questo lavoro di tesi non è stato possibile procedere in questo senso, poiché si è preferito ampliare il discorso sul comfort termico, per il quale non sono ancora disponibili modelli così avanzati per l'analisi spaziale.

#### 5c.4. Esiti della valutazione degli indici di comfort

La valutazione del comfort termico nel *living-lab* è di per sé un tassello importante del lavoro poiché ha permesso di valutare l'ambiente prima dell'installazione della nuova tecnologia facciata, e quindi potrà essere metro di confronto per futuri studi. Inoltre, i risultati ottenuti da questa sezione ci permettono di esaminare nel complesso l'analisi sperimentale effettuata, l'obiettivo dettato in partenza era valutare l'efficacia di una strumentazione *low-cost* nel definire la qualità ambientale interna. Per permettere una visione completa e dettagliata del funzionamento dello strumento e della lavorazione dei dati si è deciso di procedere per livelli di dettaglio; questo ha reso possibile inquadrare durante la fase di analisi dei dati molteplici problematiche, risolte nell'esposizione dei risultati. Dagli esiti sembra chiaro che la realizzazione dell'obiettivo auspicato sia possibile, l'ambiente è stato categorizzato ugualmente da tutti i livelli di strumentazione definiti. Sono anche state riscontrate delle differenze tra i singoli risultati ottenuti, però trattandosi di un primo tentativo questo risvolto è più che soddisfacente. Potendo approfondire l'argomento molto probabilmente si potrebbe arrivare ad un'accuratezza maggiore.

## 6. Verso un design umanocentrico

Per valutare la qualità ambientale *indoor* non è sufficiente considerare un unico punto che rappresenti la posizione dell'occupante, specialmente se le analisi vengono svolte durante la fase progettuale; infatti, è essenziale conoscere la variazione spaziale delle condizioni di comfort in modo da definire le caratteristiche del progetto come la posizione dell'arredo interno o la composizione dell'involucro esterno. Questo tipo di valutazione è comunemente usata per il comfort visivo tramite le tecniche CBDM ma non altrettanto in riferimento al comfort termico, nonostante sia fortemente influenzato dalla posizione a vista della temperatura media radiante, che dipende per buona parte dalle modalità con cui avviene lo scambio termico radiativo tra occupante e superficie, condizionato dal fattore di vista che intercorre tra i due, ma anche dalla radiazione solare incidente.

L'obiettivo generale della spazializzazione del modello di comfort termico è quello di poter valutare il comportamento dei KPIs rispetto alla posizione in cui vengono calcolati, per poter definire progettualmente quali dovrebbero essere le caratteristiche della tecnologia di facciata installata. Riferendosi nello specifico al *living-lab*, nel quale è stata effettuata la sperimentazione, potrebbe essere utile utilizzare il modello per definire le proporzioni delle nuove tecnologie che si intendono collocare al suo interno.

Nei capitoli precedenti è stata testata l'accuratezza dei modelli di calcolo ed è stato dimostrato che l'ambiente viene caratterizzato allo stesso modo anche utilizzando il livello con il più basso numero di variabili misurate necessarie cioè il livello 5, che praticamente richiede solo le misure della temperatura dell'aria interna ed esterna e della radiazione solare. Valutare spazialmente l'ambiente attraverso il modello appena citato significa avere la reale possibilità di poter testare la risposta ambientale di comfort termico rispetto a differenti configurazioni dello spazio progettato. Però le considerazioni fatte in precedenza si riferiscono all'accuratezza del modello, rispetto all'utilizzo di variabili e della loro postproduzione, mantenendo invariata la posizione e le condizioni al contorno; per verificare il funzionamento del modello anche dal punto di vista spaziale è necessario confrontarlo con un *Gold standard*. In questo caso il *Gold standard* non può più essere la Stazione di Comfort, poiché si riferisce ad un'unica posizione, ma deve essere anch'esso rappresentato da un modello che però utilizzi un numero maggiore di variabili, per questo si è pensato di unire differenzialmente i modelli: al modello  $T_{mr}$  da ISO7726, basato su tutte le temperature superficiali, viene aggiunto il  $\Delta T_{mr}$  calcolato rispetto alla  $R_{s,oi}$  definita attraverso la  $I_{est}$  da database.

Grazie alla disponibilità dei dati e alla definizione dei modelli, è stato possibile utilizzare il modello spaziale per valutare entrambe le configurazioni, sia per la stagione di riscaldamento che di raffrescamento:

- Facciata A => configurazione precedente del *living-lab*
- Facciata B => configurazione riferita alla nuova tecnologia d'involucro installata

In questo modo è possibile avere una valutazione completa per entrambe le facciate e non riferita esclusivamente ai dati raccolti nel periodo in cui era installata.

La griglia di punti per la quale è stata effettuata l'analisi è di 0,50x0,50 m, considerata ad un'altezza di 0,90 m, e incorpora la posizione dell'occupante ipotizzata per le analisi precedenti. A partire dalla griglia sono stati definiti i fattori di vista e gli angoli solari per ogni punto, i primi necessari per il calcolo della temperatura radiante i secondi per la radiazione solare incidente.

Per entrambe le configurazioni sono stati calcolati gli indici di  $T_{op}$  e di PMV rispetto al lungo periodo (9-13 agosto, per la stagione estiva; 9 dicembre-6 gennaio, per la stagione invernale) seguendo il Metodo A, valutando le ore di superamento del limite definito dalla categoria, secondo i risultati ottenuti nel capitolo 5c:

- $T_{op}$  => stagione estiva = stagione invernale = Categoria I
- PMV => stagione estiva = Categoria II; stagione invernale = Categoria IV



Immagine 41. Griglia di punti per la facciata A

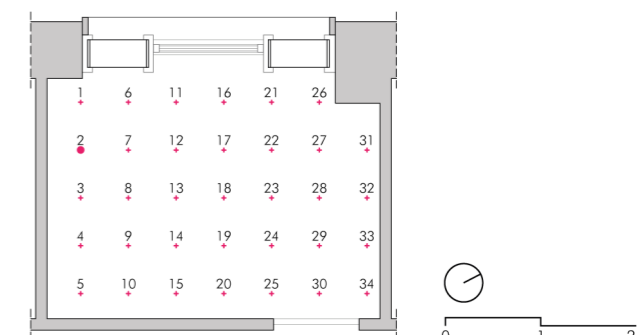


Grafico 42. Griglia di punti per la facciata B

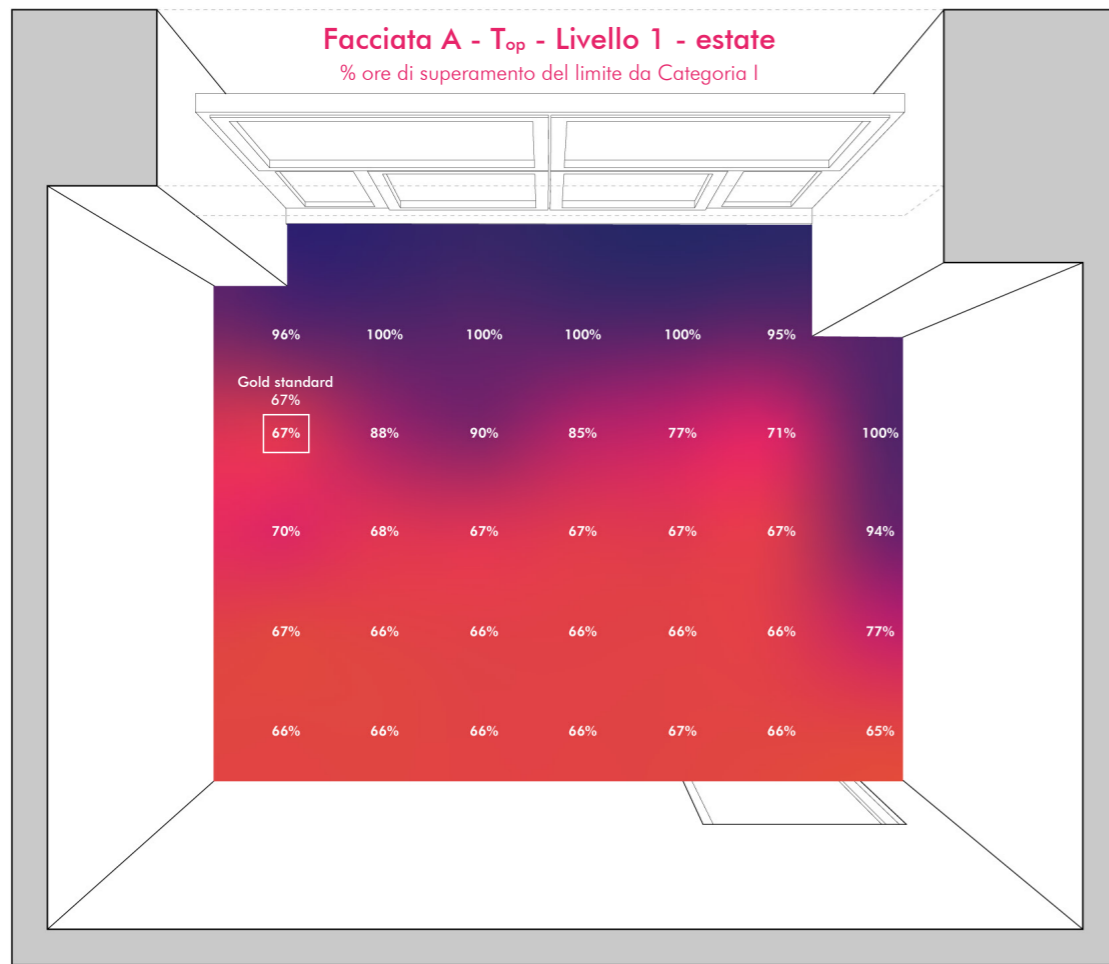


Immagine 43. Modello spaziale L1-%h<sub>superamento-T<sub>op</sub></sub> per la facciata A nella stagione estiva

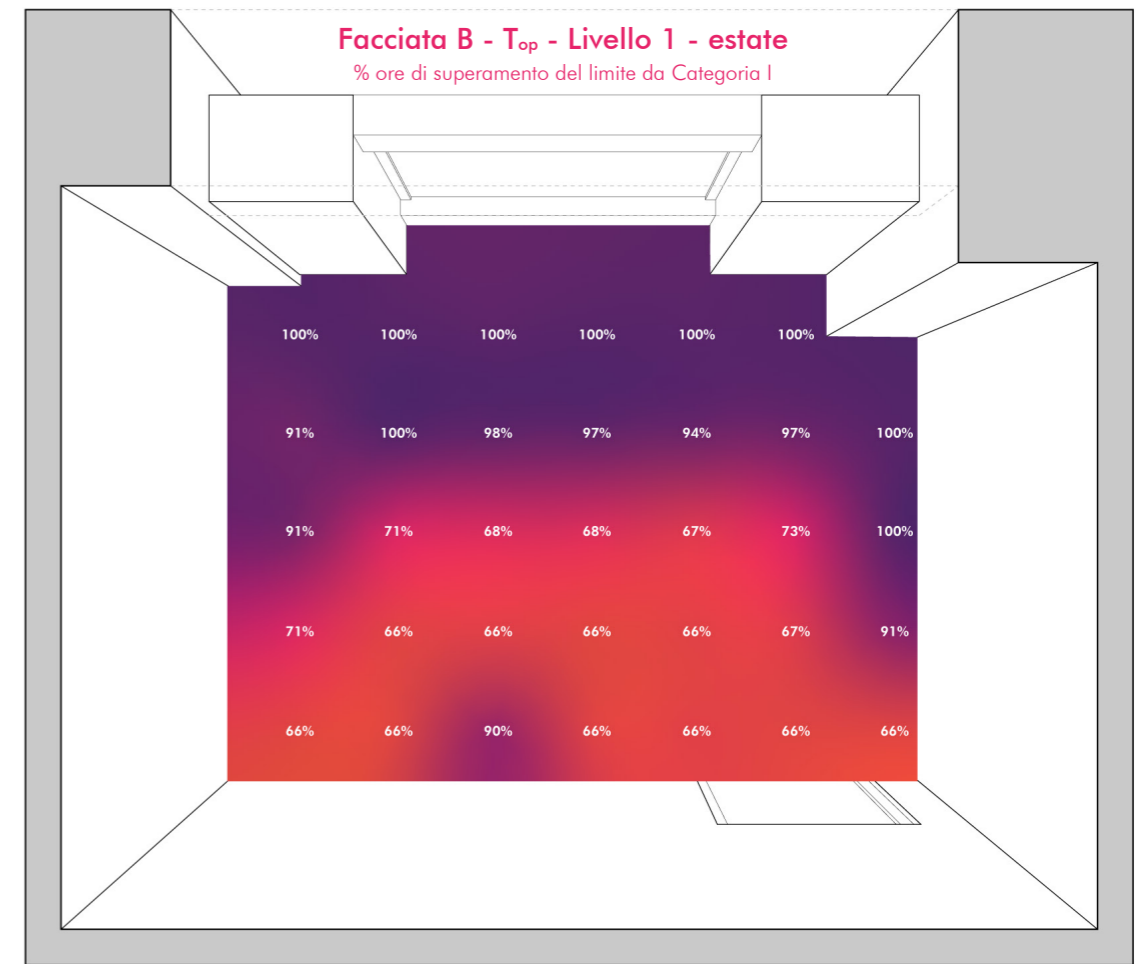


Immagine 45. Modello spaziale L1-%h<sub>superamento-T<sub>op</sub></sub> per la facciata B nella stagione estiva

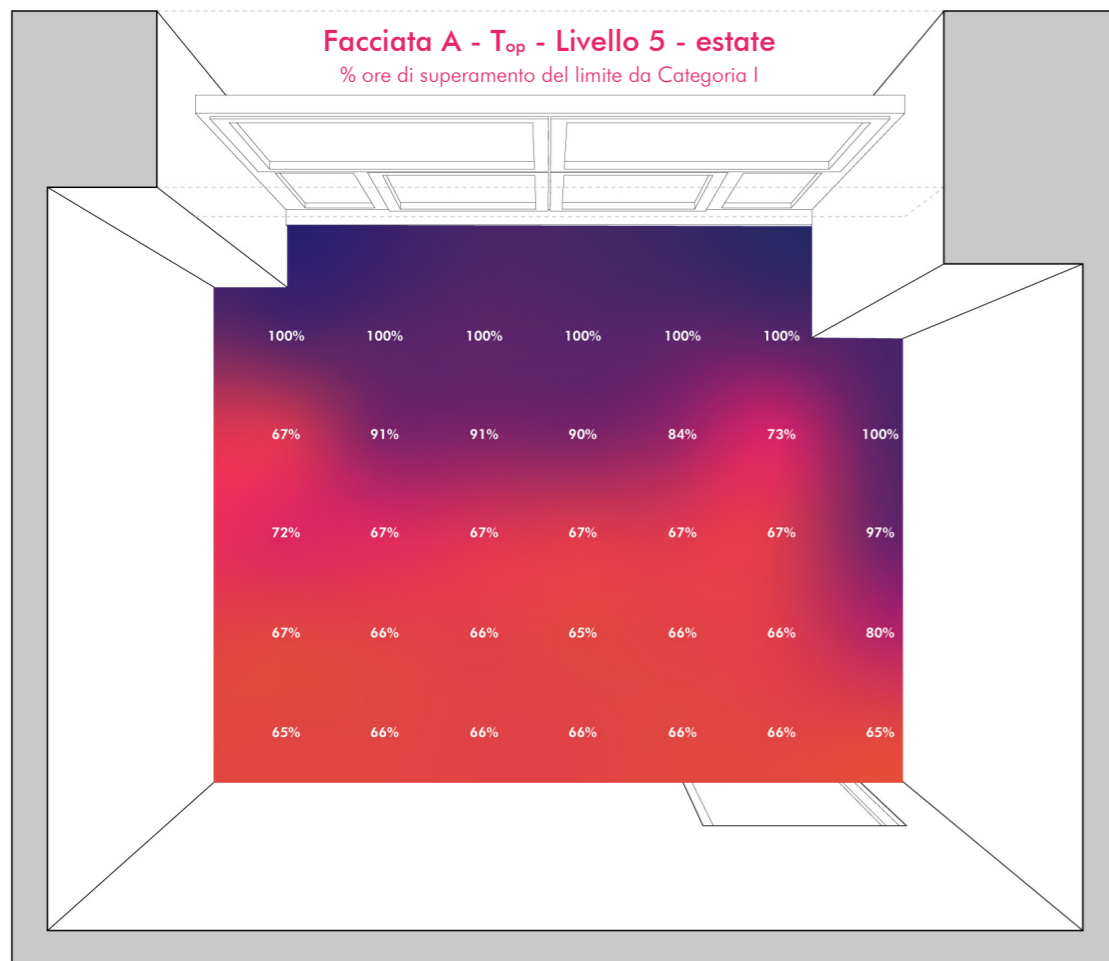


Immagine 44. Modello spaziale L5-%h<sub>superamento-T<sub>op</sub></sub> per la facciata A nella stagione estiva

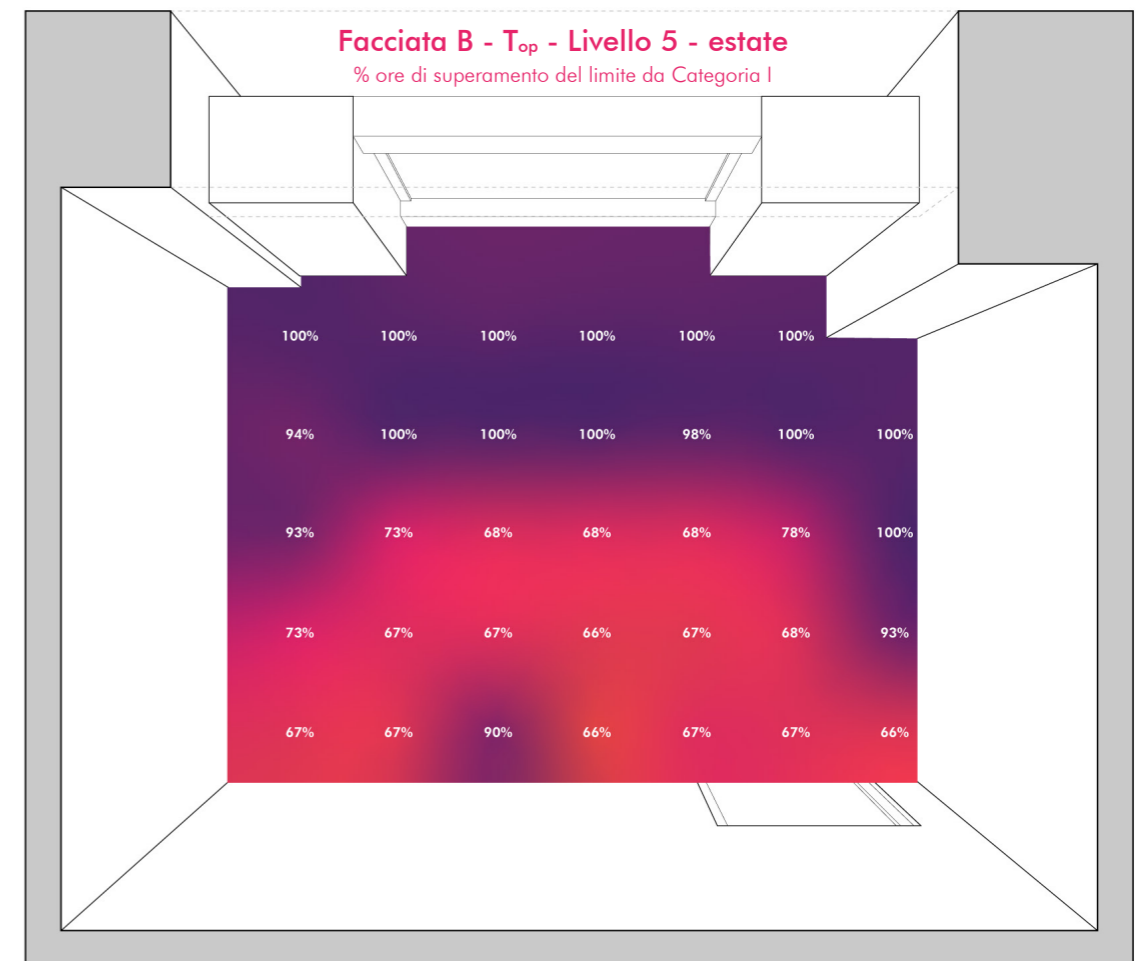
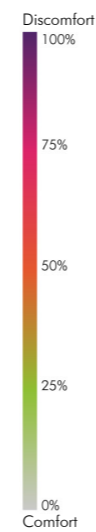


Immagine 46. Modello spaziale L5-%h<sub>superamento-T<sub>op</sub></sub> per la facciata B nella stagione estiva

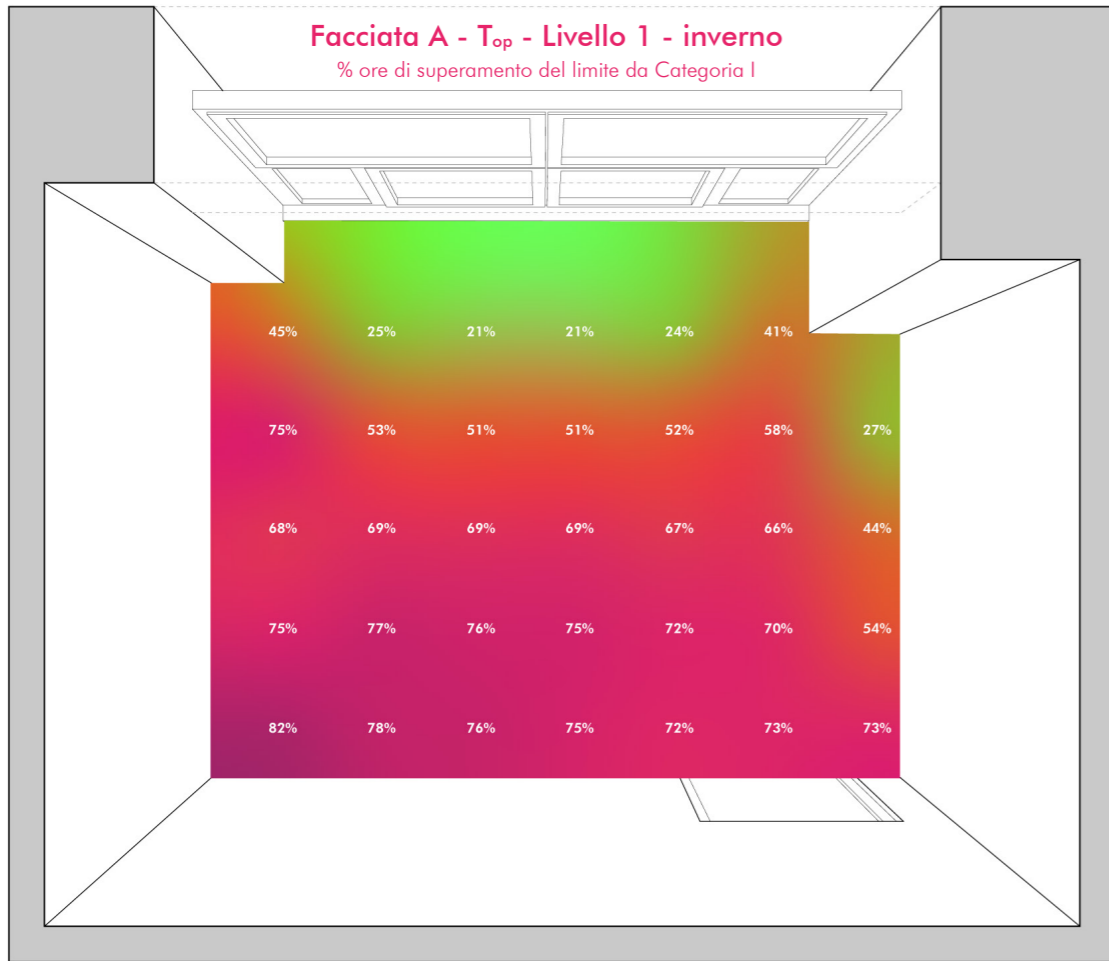


Immagine 47. Modello spaziale L1-%h<sub>superamento-T<sub>op</sub></sub> per la facciata A nella la stagione invernale

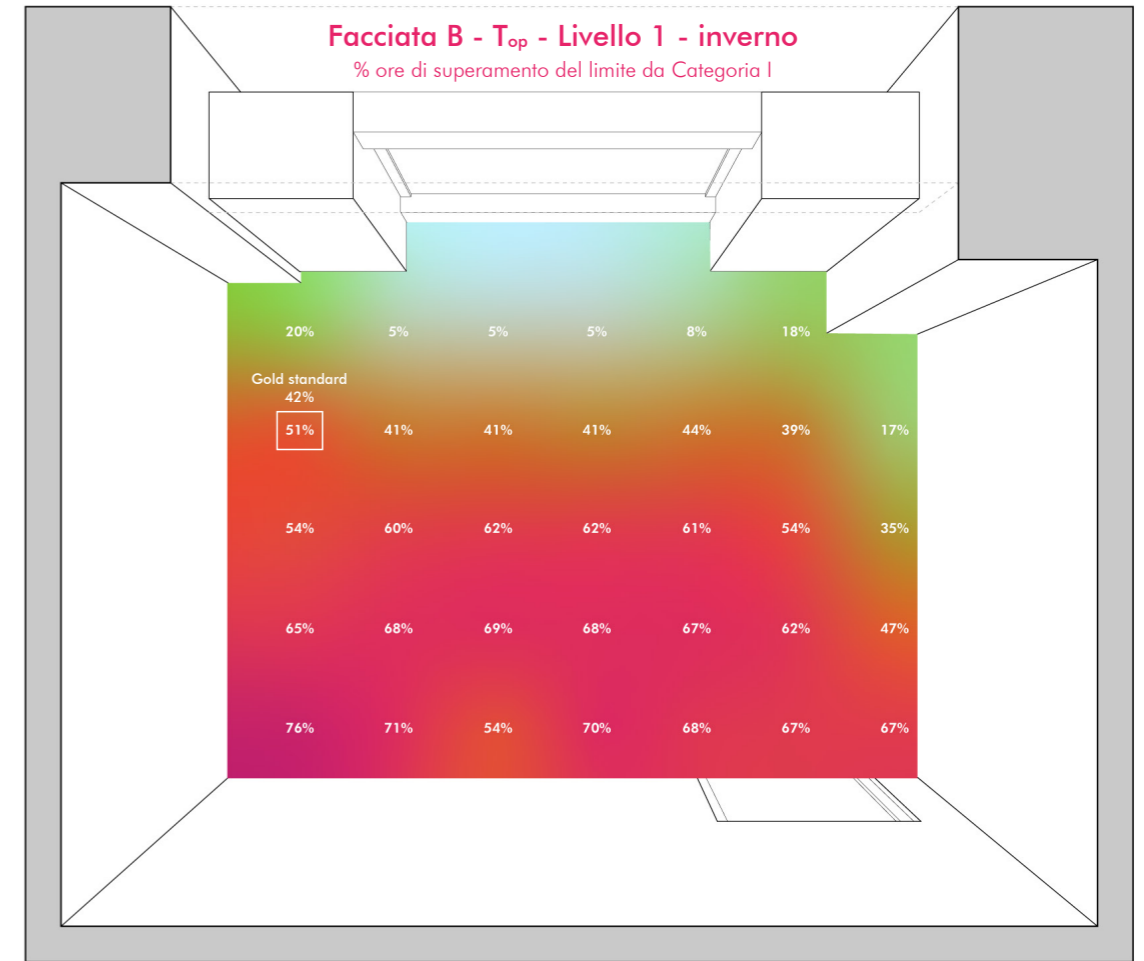


Immagine 49. Modello spaziale L1-%h<sub>superamento-T<sub>op</sub></sub> per la facciata B nella la stagione invernale

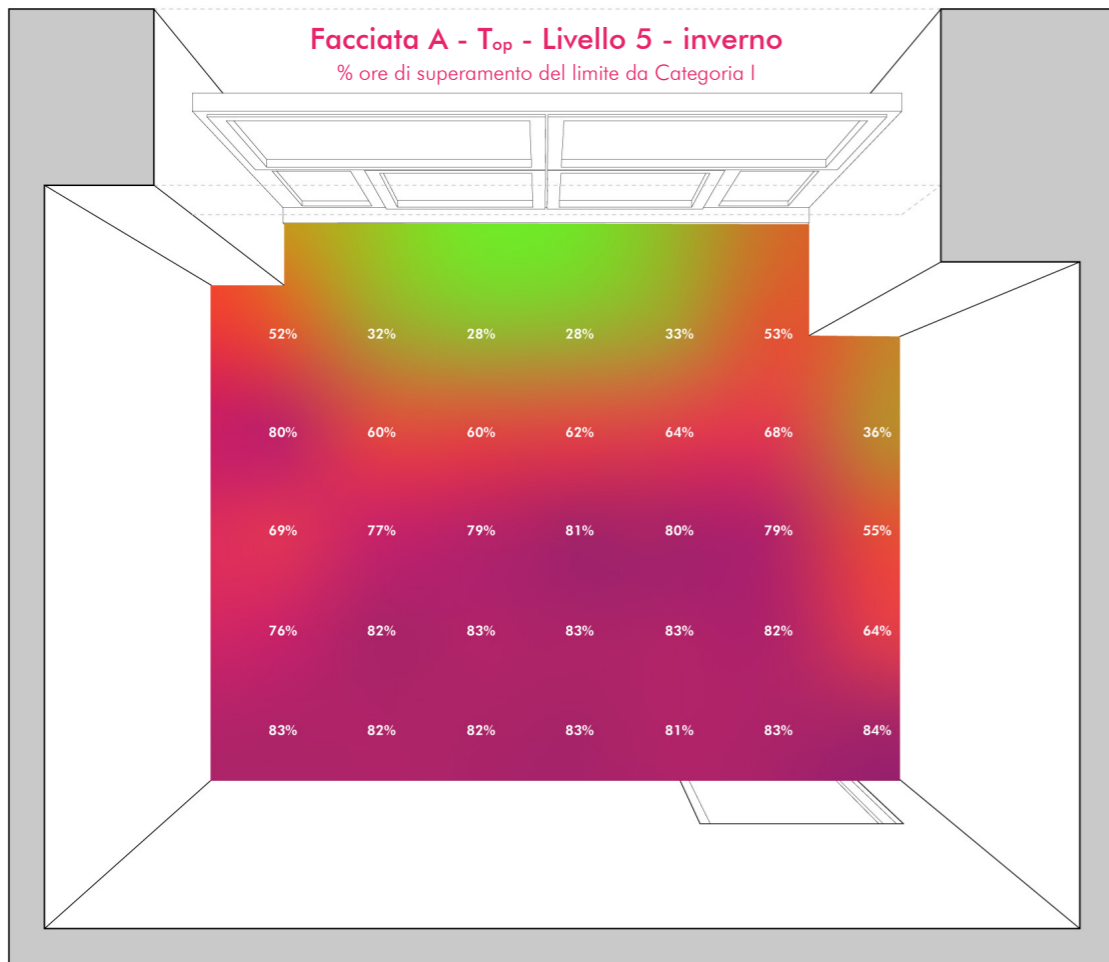


Immagine 48. Modello spaziale L5-%h<sub>superamento-T<sub>op</sub></sub> per la facciata A nella la stagione invernale

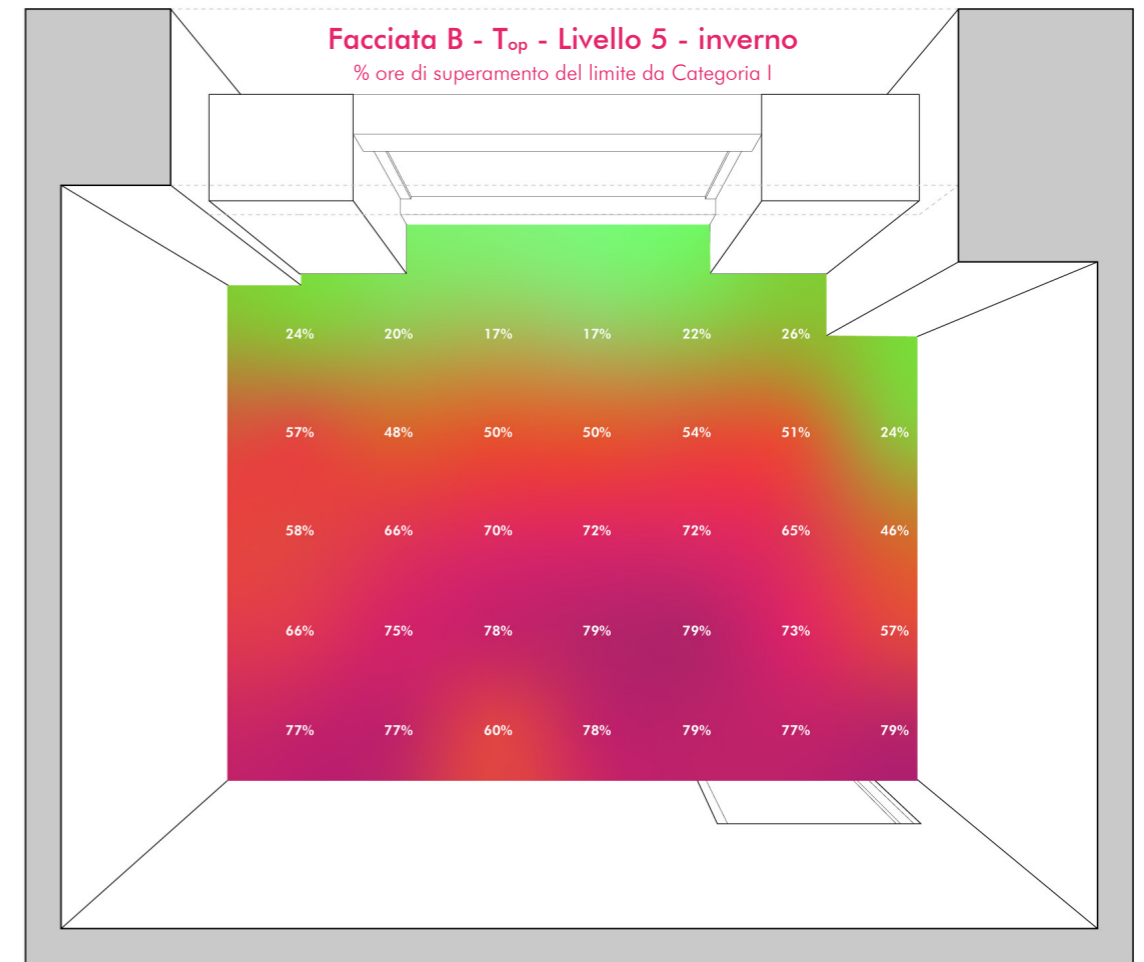


Immagine 50. Modello spaziale L5-%h<sub>superamento-T<sub>op</sub></sub> per la facciata B nella la stagione invernale

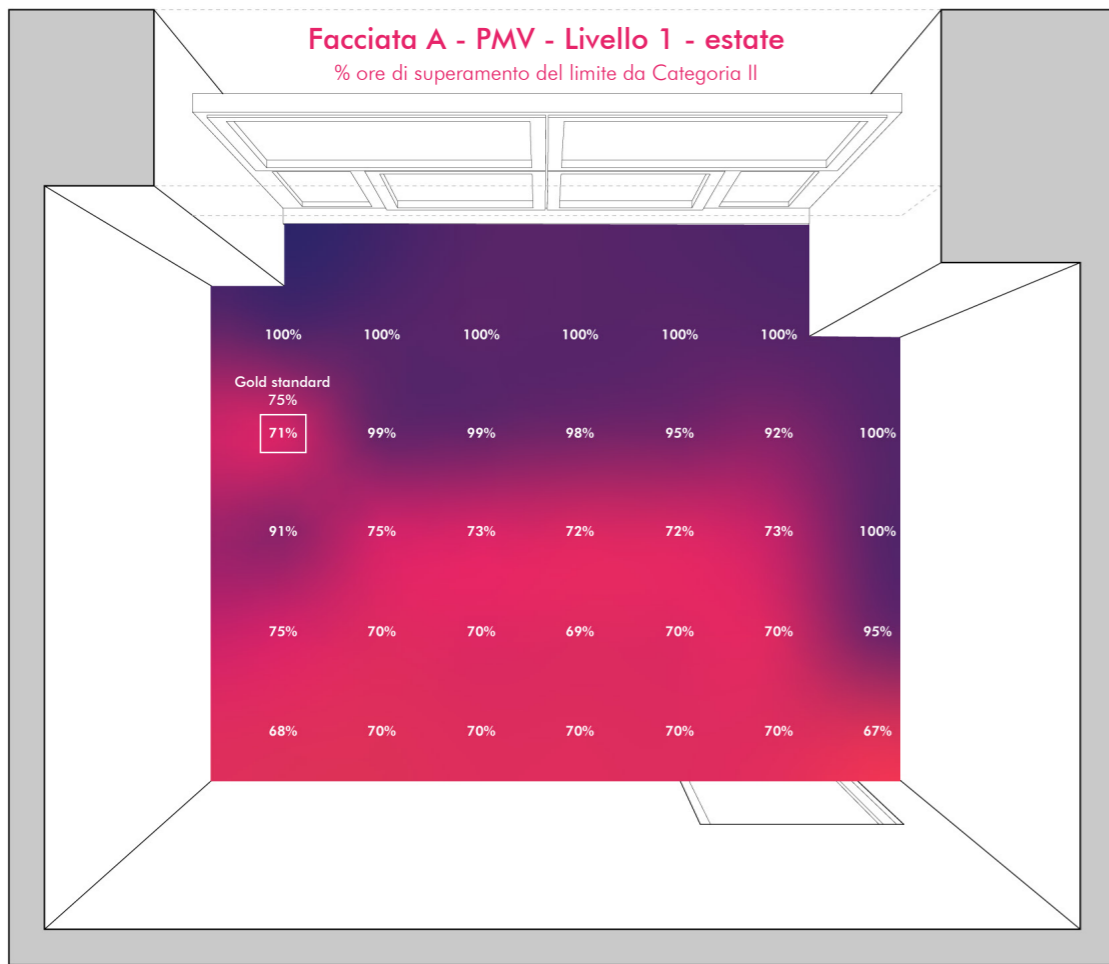


Immagine 51. Modello spaziale L1-%h<sub>superamento</sub>-PMV per la facciata A nella la stagione estiva

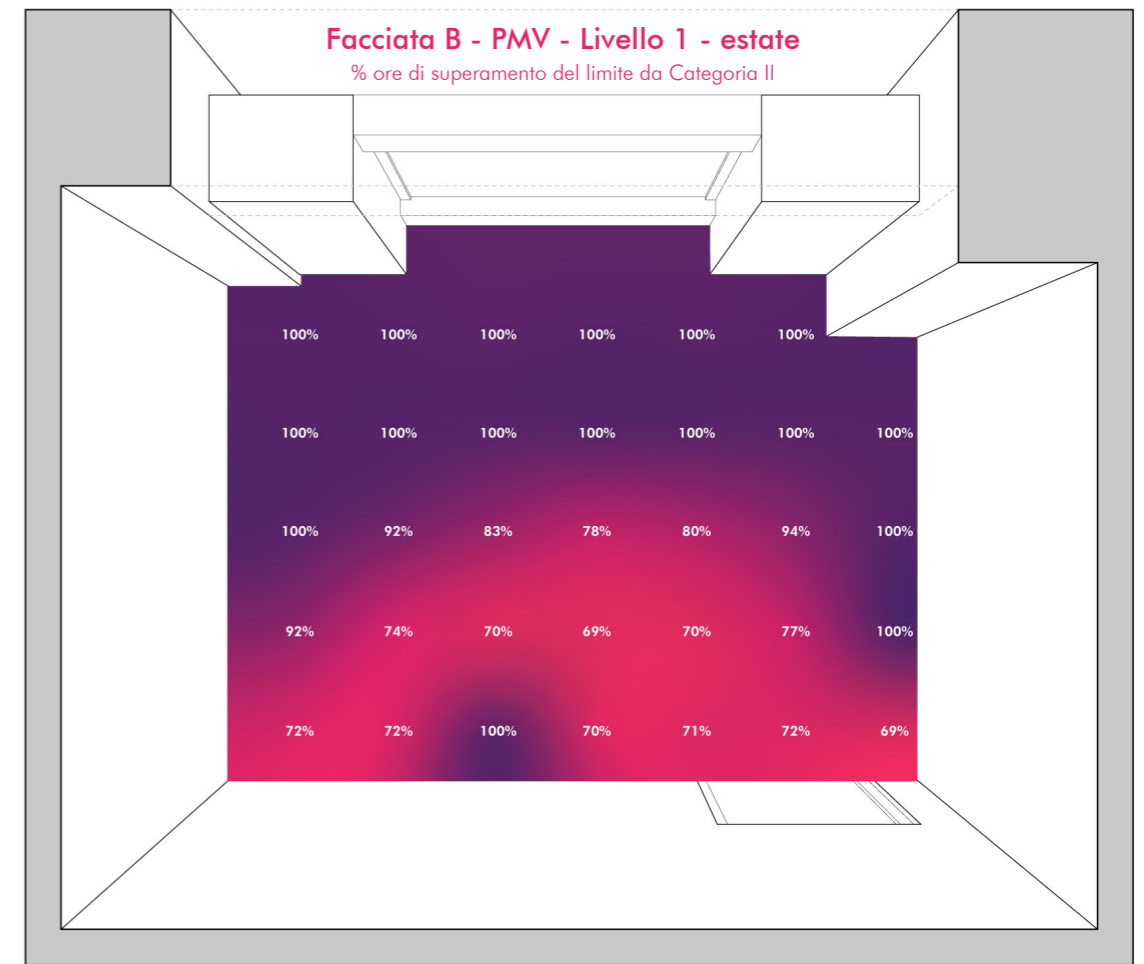


Immagine 53. Modello spaziale L1-%h<sub>superamento</sub>-PMV per la facciata B nella la stagione estiva

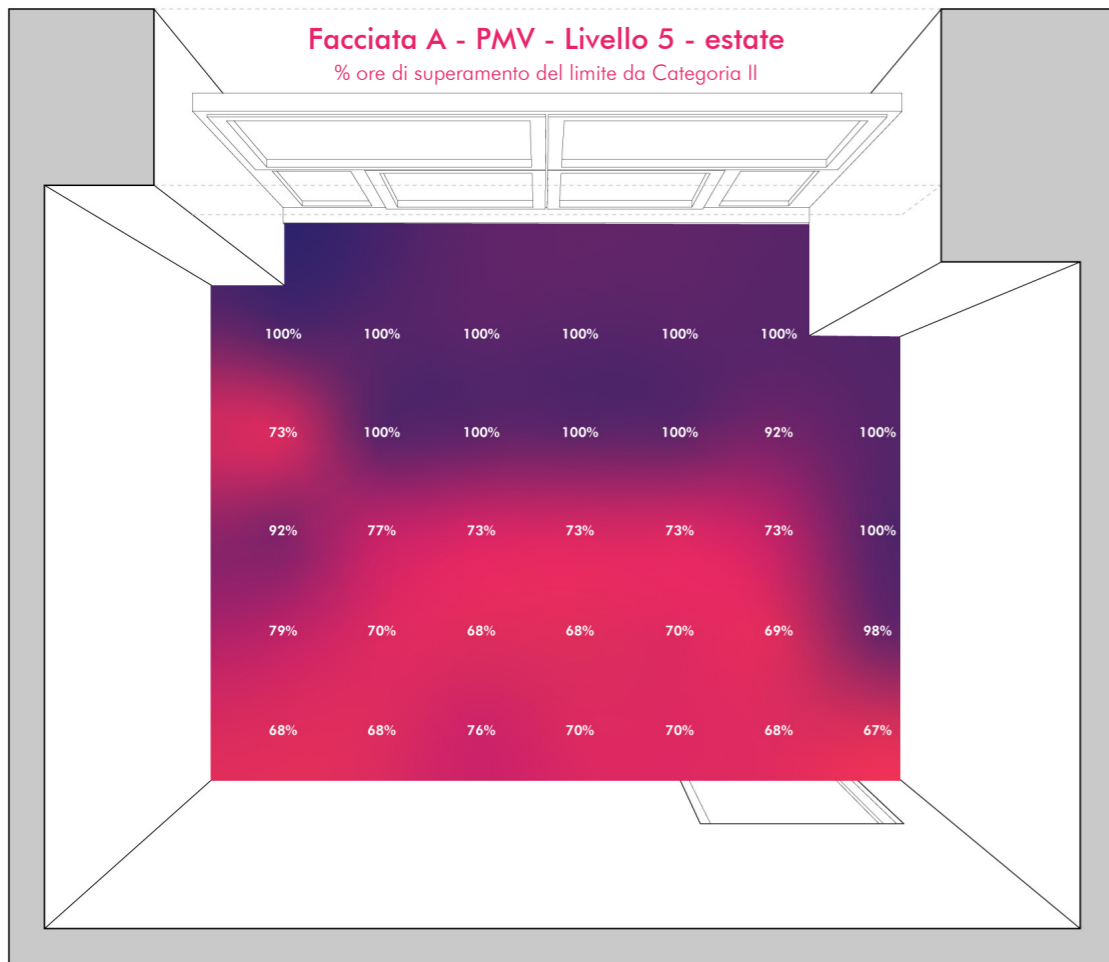


Immagine 52. Modello spaziale L5-%h<sub>superamento</sub>-PMV per la facciata A nella la stagione estiva

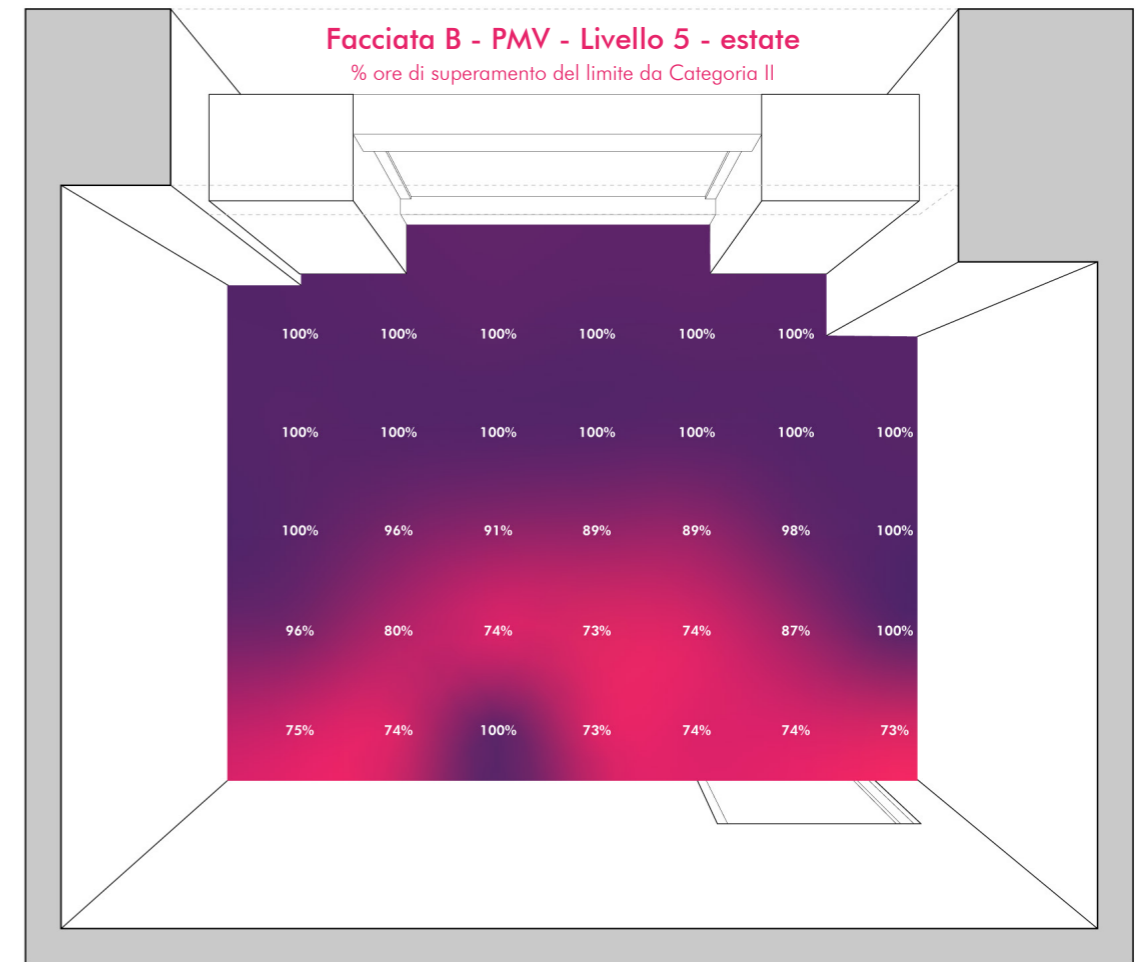
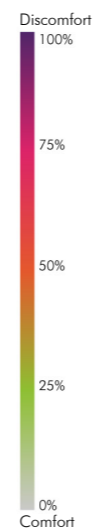


Immagine 54. Modello spaziale L5-%h<sub>superamento</sub>-PMV per la facciata B nella la stagione estiva



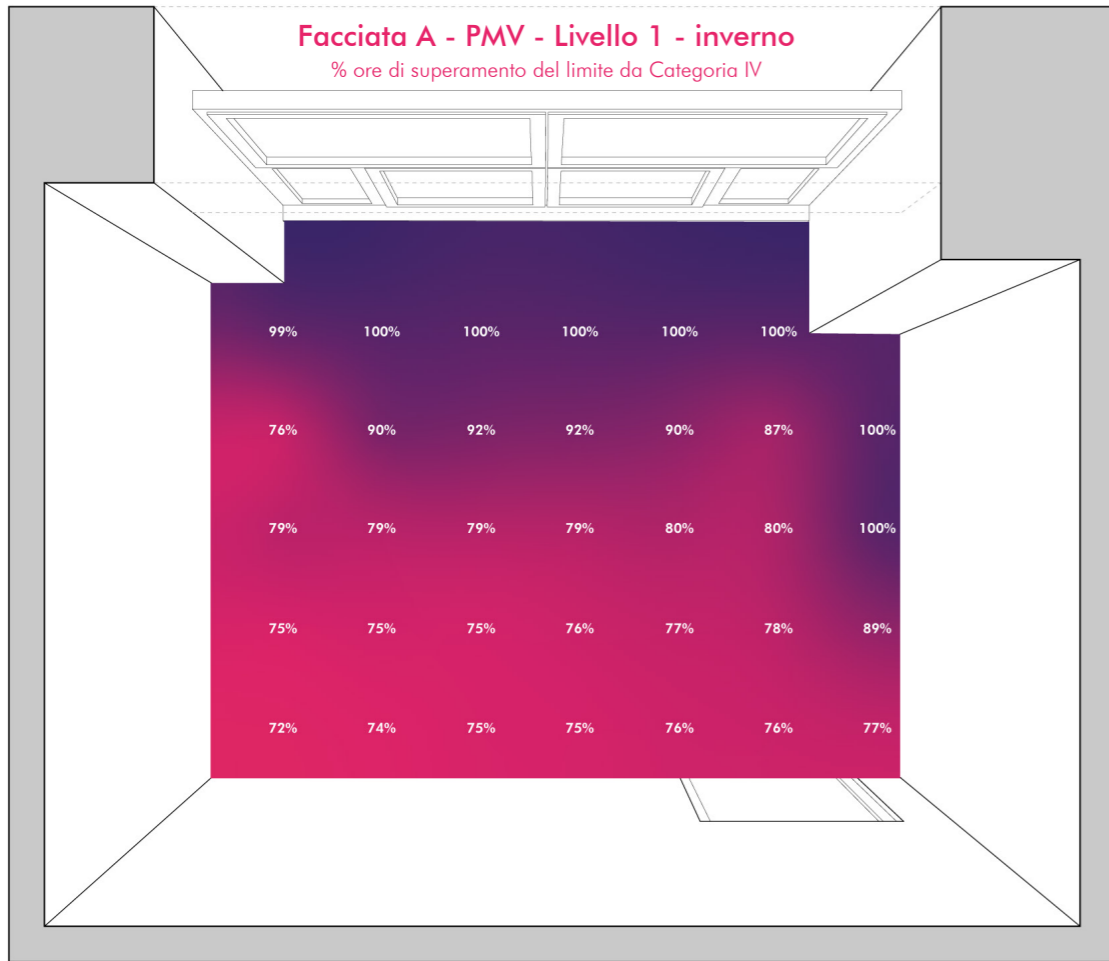


Immagine 55. Modello spaziale L1-%<sup>h</sup><sub>superamento</sub>-PMV per la facciata A nella la stagione invernale

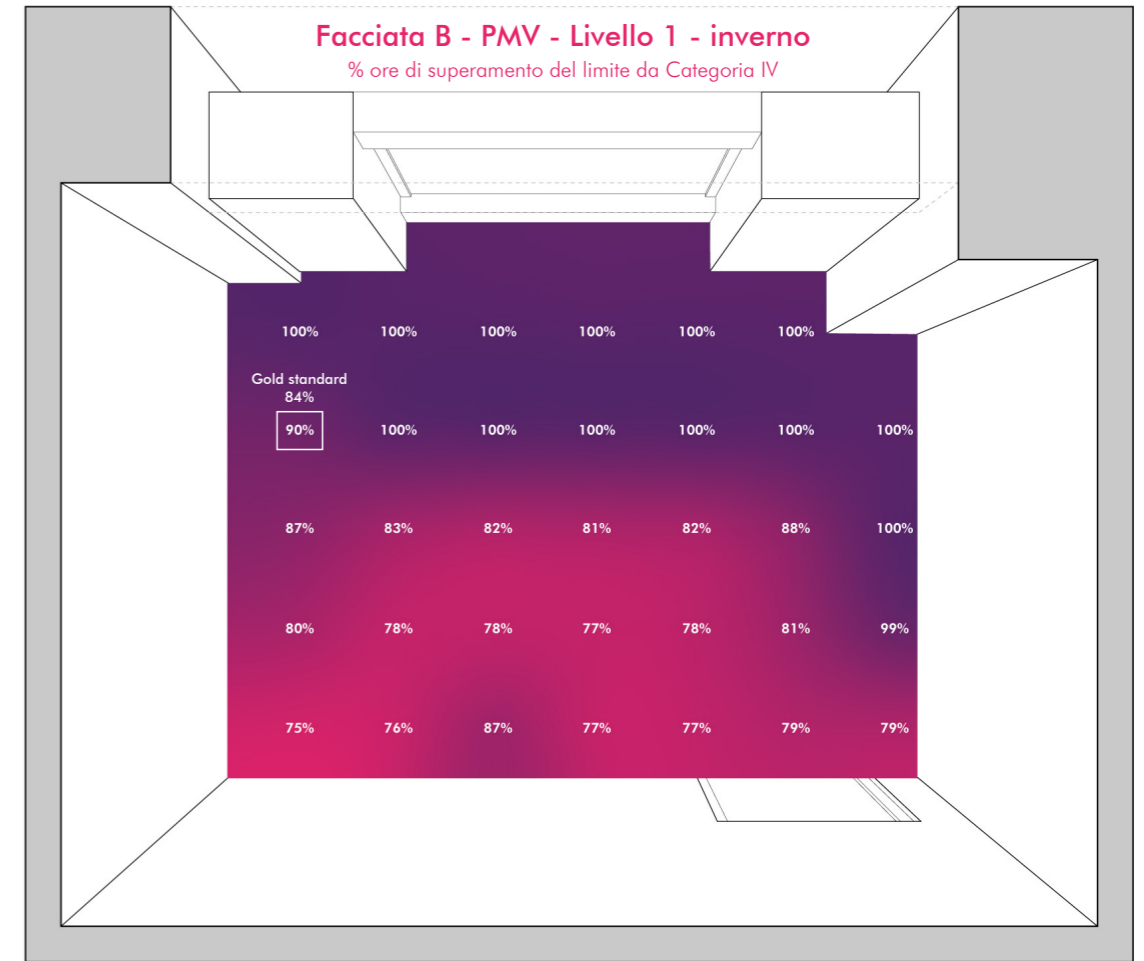


Immagine 57. Modello spaziale L1-%<sup>h</sup><sub>superamento</sub>-PMV per la facciata B nella la stagione invernale

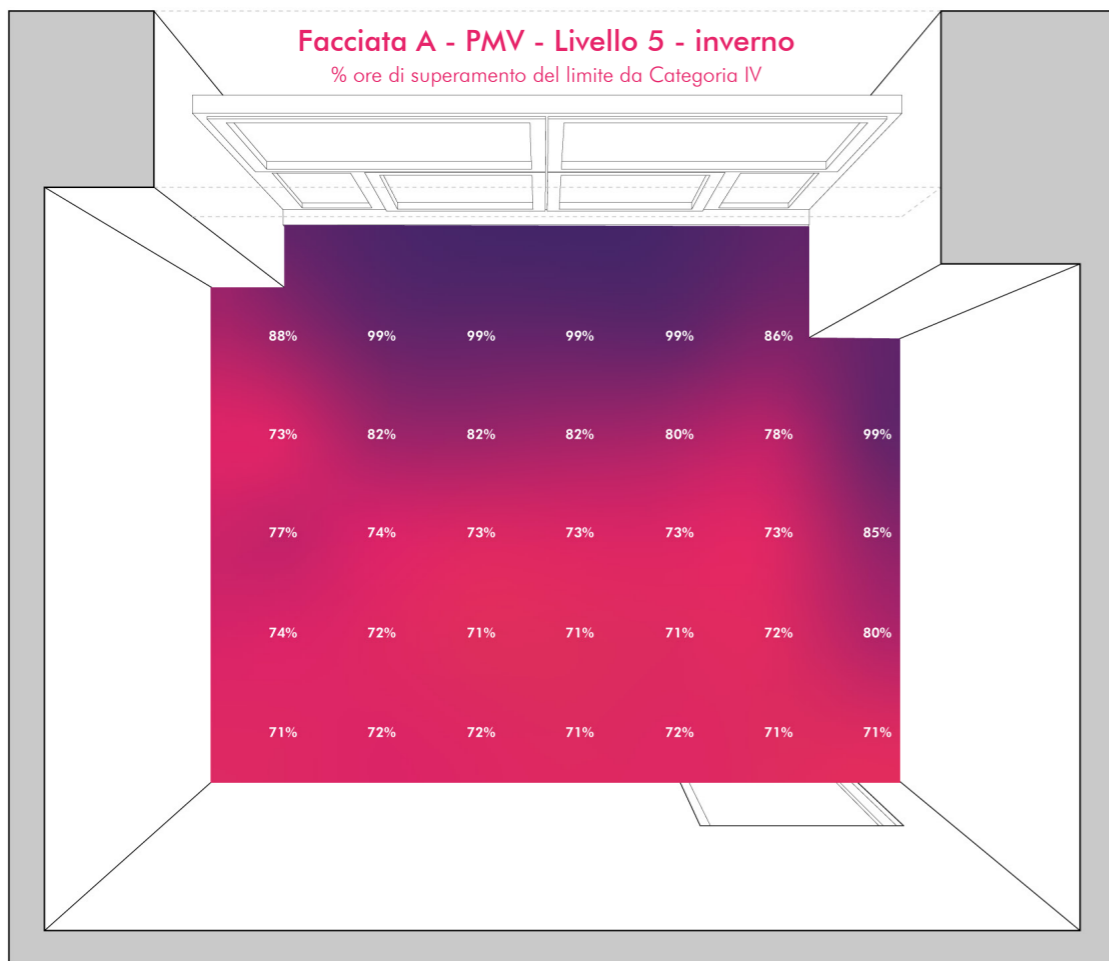


Immagine 56. Modello spaziale L5-%<sup>h</sup><sub>superamento</sub>-PMV per la facciata A nella la stagione invernale

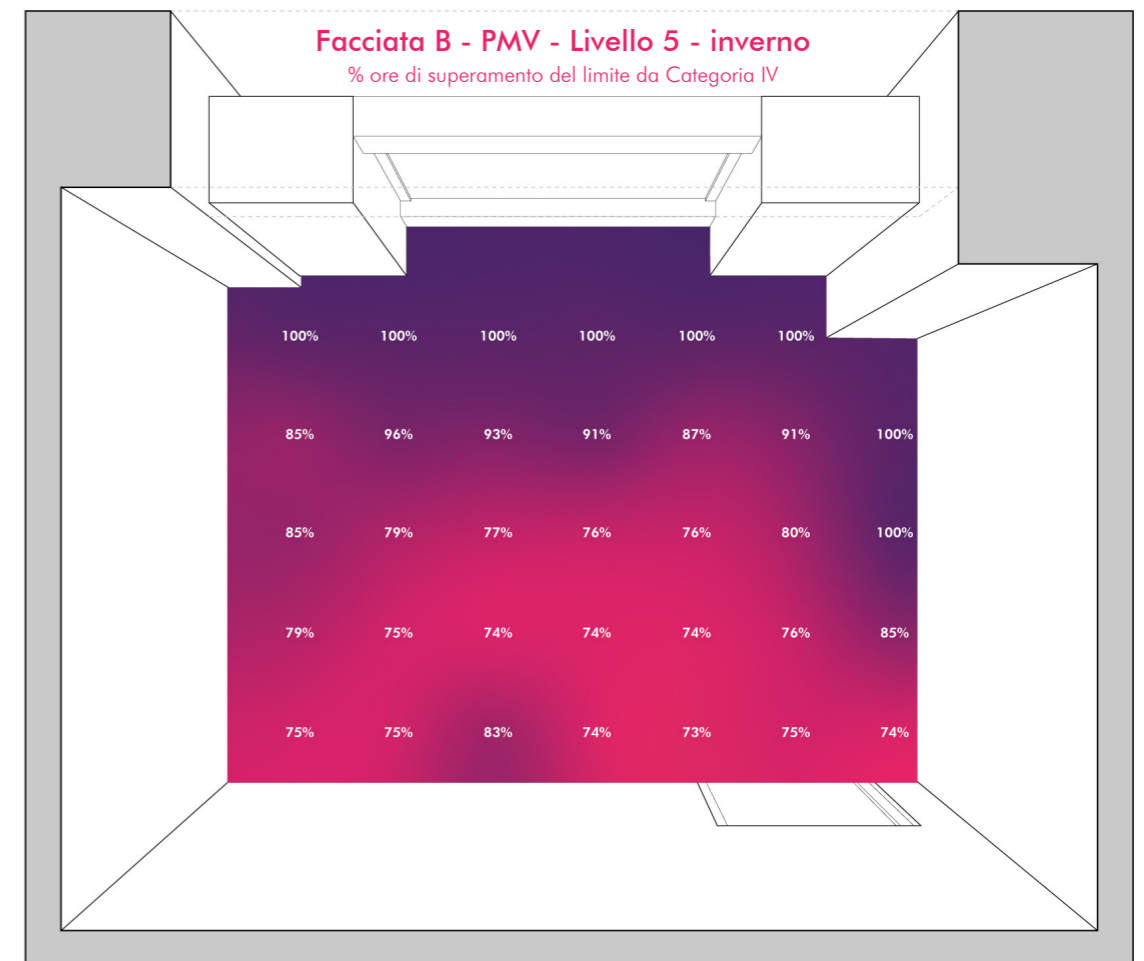


Immagine 58. Modello spaziale L5-%<sup>h</sup><sub>superamento</sub>-PMV per la facciata B nella la stagione invernale

Da questo tipo di valutazione è possibile definire un design umanocentrico concentrato sul rispetto delle condizioni di benessere e salute dell'occupante. Potendo esaminare spazialmente l'edificio possono essere valutate molteplici caratteristiche che permettono il miglioramento delle soluzioni progettuali. Inoltre, questo tipo di valutazione potrebbe aggiungersi a quelle già definite dai protocolli di certificazione, definendo la performance dell'ambiente rispetto alla percentuale di spazio che rispetta un certo limite. I risultati ottenuti sono abbastanza in linea con ciò che ci si aspettava di ottenere. In generale tra i due livelli le differenze sono minime, ciò appura ulteriormente il funzionamento del livello 5 che definisce il comfort termico attraverso tre variabili: temperatura dell'aria interna ed esterna e radiazione solare.

Per quanto riguarda la temperatura operativa la condizione di comfort in estate peggiora avvicinandosi alla facciata, la situazione si ribalta per la stagione invernale, ciò però non accade per il PMV. Anche rispetto alla nuova configurazione di facciata il comportamento dei due indici differisce: per la Top le condizioni peggiorano in estate e migliorano in inverno, mentre per il PMV i livelli di comfort diminuiscono in entrambe le stagioni. Per esaminare il funzionamento del modello si potrebbe valutare il comportamento dell'ufficio per la prossima stagione di raffrescamento, in modo da testare la nuova tecnologia di facciata sul campo per poi confrontare i risultati con quelli ottenuti da questa valutazione predittoria. Se il modello risulterà affidabile, l'applicazione e le considerazioni potranno essere ampliate esaminando ulteriori configurazioni, molteplici categorie e definendo degli indici di valutazione rendendolo un valido supporto alla progettazione.

## 7. Conclusioni

L'obiettivo di questo progetto di tesi era sperimentare il funzionamento di una strumentazione *low-cost* poco intrusiva per la valutazione dell'*indoor environmental quality*. Questo proposito è scaturito studiando lo stato attuale della ricerca e della normativa nel campo dell'IEQ per il mantenimento di condizioni di benessere e salute per gli occupanti. Il rispetto dei requisiti di comfort è diventato sempre più importante in campo architettonico, poiché se l'utente è soddisfatto non ricade nell'utilizzo eccessivo degli impianti, riducendo così i consumi energetici e di conseguenza l'impatto ambientale. Inoltre, sono sempre di più le teorie che affermano che la qualità dello spazio, soprattutto quello lavorativo, influenza notevolmente il benessere psicofisico e la produttività.

Per far sì che un edificio rispetti i requisiti di qualità ambientale non è sufficiente definire un progetto che sia fedele alle prescrizioni normative e ai protocolli di certificazione ma risulta essenziale predisporre un monitoraggio continuo che permetta il controllo delle condizioni di comfort attraverso gli impianti. Questa pratica, quando presente, si limita alla sola valutazione della temperatura dell'aria che però non è per nulla efficace nel rappresentare il livello di comfort termico. Per poter definire i KPIs sono però richieste numerose variabili che per essere misurate necessitano di altrettanti sensori che sono costosi, difficili da installare e da mantenere sul lungo termine. Da qui è nata l'esigenza di sperimentare sul campo il funzionamento di differenti strumenti di misura, per poterne confrontare le caratteristiche, sulle quali basare la scelta dell'infrastruttura di riferimento.

Dopo aver monitorato per diverse settimane i parametri ambientali del *living-lab*, un ufficio collocato all'interno del Politecnico di Torino, è stato possibile confrontare la risoluzione dei singoli sensori. Attraverso quest'analisi è risultato evidente come i sensori *high-cost* permettano di avere una quantificazione più accurata della misura, mentre per quelli *low-cost* è necessario prestare una maggiore accortezza nella calibrazione. Grazie a questa valutazione sono stati definiti gli strumenti sui quali basare le considerazioni successive: la Stazione di Comfort, il *Datalogger*, il *Raspberry*.

A questo punto la questione era di definire le modalità attraverso le quali arrivare a una valutazione ambientale tramite le poche misure effettuate dal sensore *low-cost*. L'idea è stata quindi di costruire dei modelli di calcolo, che permettessero di eliminare il maggior numero possibile di variabili da misurare. Questo ha portato alla definizione di cinque livelli ognuno rappresentato da un'infrastruttura di rilevamento sempre più semplificata, partendo da un sistema *high-cost* per arrivare a uno *low-cost*. Oltre alla costruzione dei modelli di calcolo, che è stata per questa ricerca un tassello fondamentale al quale è stata dedicata molta attenzione, sono state definite anche delle assunzioni importanti. Per questo motivo la valutazione dell'IEQ è stata preceduta da un confronto sull'accuratezza dei singoli modelli rispetto al calcolo della temperatura media radiante. I risultati hanno evidenziato come l'aspetto più difficile da controllare sia la componente dovuta alla radiazione solare diretta, specialmente per la stagione estiva dove il suo impatto sulla temperatura percepita è maggiore. Nonostante le dovute accortezze, per le temperature di picco della stagione estiva tra il *Gold standard* e lo strumento *low-cost* è stato riscontrato un Delta massimo di circa 5°C, dovuto al modello  $R_{sol}$ , che considera una radiazione non misurata in situ e una costruzione geometrica per la definizione degli angoli solari.

Successivamente, il funzionamento dei cinque livelli è stato sperimentato per differenti periodi di tempo, per molteplici indici di comfort e per due diverse configurazioni della facciata, in modo da testarne la veridicità. Dai risultati ottenuti per gli indici di temperatura operativa l'ambiente risulta essere in una situazione di elevato comfort termico per l'occupante, e nonostante per alcuni valori di superamento del limite sia stato evidenziato un Delta massimo tra i livelli del 10%, il quadro rappresentato è lo stesso. Per il PMV il Delta massimo è minore dell'8% ma anche in questo caso la categorizzazione è la stessa per tutti i livelli. Questo risultato è molto soddisfacente e rende auspicabile un'applicazione pratica di questa metodologia, ma è essenziale che venga perfezionata:

- tramite ulteriori confronti con ambienti e periodi differenti;
- nell'utilizzo del software di calcolo, per questo progetto sono stati costruiti dei fogli di calcolo Excel che possono fare da base per la scrittura di un codice;
- nella definizione di alcuni modelli, soprattutto  $T_{s(op)}$  e  $R_{sol}$ , che possono essere implementati da considerazione più approfondite.

In fine, si è pensato di dare un ulteriore apporto alla ricerca provando a definire un modello valutativo del progetto architettonico, che determina le condizioni di comfort rispetto all'area del piano di riferimento. Un design umanocentrico non può eludere a considerazioni riguardanti tutti i parametri di comfort, per questo è necessario testare delle modalità d'analisi che a partire dalle ipotesi di progetto permettano di valutare l'IEQ nella sua interezza. Anche in questo caso si è deciso di confrontare due livelli dell'infrastruttura di rilevamento differenti, per testarne il funzionamento. I risultati hanno permesso di visualizzare le condizioni di comfort per differenti configurazioni dello spazio. Però sono necessarie ulteriori analisi prima di poterne comprendere a pieno l'attendibilità.

La sperimentazione intrapresa può rappresentare un valido supporto in futuri progetti di ricerca per la scelta dell'infrastruttura di rilevamento in relazione all'interazione con l'occupante e alla qualità finale del dato; ad esempio, per il monitoraggio di tecnologie d'involucro trasparente in edifici fortemente vetrati che necessitino di un maggiore controllo rispetto alla radiazione solare diretta. Inoltre, potrebbe essere la base per un progetto di ricerca più approfondito che permetta di ridurre l'impatto degli strumenti di misura, sull'ambiente vissuto e sul dato analizzato, con l'obiettivo di costruire architetture sempre più antropocentriche, riducendo però l'uso di risorse naturali.

## Indice grafici

Grafico 01. Range di temperatura operativa	18
Grafico 02. Temperatura dell'aria per la stagione estiva nel giorno soleggiato	42
Grafico 03. Temperatura dell'aria per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	42
Grafico 04. Temperatura dell'aria per la stagione invernale nel giorno soleggiato	43
Grafico 05. Temperatura dell'aria per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	43
Grafico 06. Umidità relativa per la stagione estiva nel giorno soleggiato	44
Grafico 07. Umidità relativa per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	44
Grafico 08. Umidità relativa per la stagione invernale nel giorno soleggiato	45
Grafico 09. Umidità relativa per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	45
Grafico 10. Illuminamento orizzontale per la stagione estiva nel giorno soleggiato	46
Grafico 11. Illuminamento orizzontale per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	46
Grafico 12. Illuminamento orizzontale per la stagione invernale nel giorno soleggiato	47
Grafico 13. Illuminamento orizzontale per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	47
Grafico 14. Illuminamento verticale per la stagione estiva nel giorno soleggiato	48
Grafico 15. Illuminamento verticale per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	48
Grafico 16. Illuminamento verticale per la stagione invernale nel giorno soleggiato	49
Grafico 17. Illuminamento verticale per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	49
Grafico 18. Concentrazione di CO <sub>2</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato	50
Grafico 19. Concentrazione di CO <sub>2</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	50
Grafico 20. Concentrazione di CO <sub>2</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato	51
Grafico 21. Concentrazione di CO <sub>2</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	51
Grafico 22. Modello T <sub>mr</sub> basato sulla norma ISO7726 per la stagione estiva nel giorno soleggiato	57
Grafico 23. Modello T <sub>mr</sub> basato sulla norma ISO7726 per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	57
Grafico 24. Modello T <sub>mr</sub> basato sulla norma ISO7726 per la stagione invernale nel giorno soleggiato	57
Grafico 25. Modello T <sub>mr</sub> basato sulla norma ISO7726 per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	57
Grafico 26. Temperature dell'involcro opaco per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)	58
Grafico 27. Temperature dell'involcro opaco per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-13 dicembre)	58
Grafico 28. Modello ΔT <sub>mr</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato	61
Grafico 29. Modello ΔT <sub>mr</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	61
Grafico 30. Modello ΔT <sub>mr</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato	61
Grafico 31. Modello ΔT <sub>mr</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	61
Grafico 32. Radiazione solare (E <sub>s</sub> ) per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)	62
Grafico 33. Radiazione solare (E <sub>s</sub> ) per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-13 dicembre)	62
Grafico 34. Modello T <sub>op</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato	69
Grafico 35. Modello T <sub>op</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	69
Grafico 36. Modello T <sub>op</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato	69
Grafico 37. Modello T <sub>op</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	69
Grafico 38. Modello T <sub>op</sub> per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)	70
Grafico 39. Valore delle T <sub>op</sub> rispetto alla Categoria I per la stagione estiva (9-13 agosto)	70
Grafico 40. Valore delle T <sub>op</sub> rispetto alla Categoria II per la stagione estiva (9-13 agosto)	70
Grafico 41. Valore delle T <sub>op</sub> rispetto alla Categoria III per la stagione estiva (9-13 agosto)	71
Grafico 42. Valore delle T <sub>op</sub> rispetto allimita di T <sub>a</sub> per la stagione estiva (9-13 agosto)	71
Grafico 43. Categorie secondo il metodo A (16798-2) per la stagione estiva (9-13 agosto)	71
Grafico 44. Risultati metodo B per la stagione estiva (9-13 agosto)	72
Grafico 45. Modello T <sub>op</sub> per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-21 dicembre)	72
Grafico 46. Valore delle T <sub>op</sub> rispetto alla Categoria I per la stagione invernale (9-21 dicembre)	72
Grafico 47. Valore delle T <sub>op</sub> rispetto alla Categoria II per la stagione invernale (9-21 dicembre)	72
Grafico 48. Valore delle T <sub>op</sub> rispetto alla Categoria III per la stagione invernale (9-21 dicembre)	73
Grafico 49. Valore delle T <sub>op</sub> rispetto alla Categoria IV per la stagione invernale (9-21 dicembre)	73
Grafico 50. Categorie secondo il metodo A (16798-2) per la stagione invernale (9-21 dicembre)	73
Grafico 51. Categorie secondo il metodo B (16798-2) per la stagione invernale (9-21 dicembre)	74
Grafico 52. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in inverno (Livello 1)	74
Grafico 53. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in estate (Livello 1)	74
Grafico 54. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in inverno (Livello 2)	74
Grafico 55. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in estate (Livello 2)	74
Grafico 56. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in inverno (Livello 3)	75
Grafico 57. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in estate (Livello 3)	75
Grafico 58. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in inverno (Livello 4)	75
Grafico 59. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in estate (Livello 4)	75

Grafico 60. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in inverno (Livello 5)	75
Grafico 61. Dispersione T <sub>op</sub> rispetto ai limiti in estate (Livello 5)	75
Grafico 62. Modello PMV per la stagione estiva nel giorno soleggiato	76
Grafico 63. Modello PMV per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	76
Grafico 64. Modello PMV per la stagione invernale nel giorno soleggiato	76
Grafico 65. Modello PMV per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	76
Grafico 66. Modello PPD per la stagione estiva nel giorno soleggiato	77
Grafico 67. Modello PPD per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	77
Grafico 68. Modello PPD per la stagione invernale nel giorno soleggiato	77
Grafico 69. Modello PPD per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	77
Grafico 70. Modello PMV per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)	78
Grafico 71. Valori del PMV rispetto alla Categoria I per la stagione estiva (9-13 agosto)	78
Grafico 72. Valori del PMV rispetto alla Categoria II per la stagione estiva (9-13 agosto)	78
Grafico 73. Valori del PMV rispetto alla Categoria III per la stagione estiva (9-13 agosto)	78
Grafico 74. Valori del PMV rispetto alla Categoria IV per la stagione estiva (9-13 agosto)	78
Grafico 75. Modello PPD per la stagione estiva nelle ore d'occupazione (9-13 agosto)	79
Grafico 76. Valori del PPD rispetto alla Categoria I per la stagione estiva (9-13 agosto)	79
Grafico 77. Valori del PPD rispetto alla Categoria II per la stagione estiva (9-13 agosto)	79
Grafico 78. Valori del PPD rispetto alla Categoria III per la stagione estiva (9-13 agosto)	79
Grafico 79. Valori del PPD rispetto alla Categoria IV per la stagione estiva (9-13 agosto)	79
Grafico 80. Categorie di PMV per la stagione estiva (9-13 agosto)	80
Grafico 81. Medie di PPD per la stagione estiva (9-13 agosto)	80
Grafico 82. Modello PMV per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-21 dicembre)	81
Grafico 83. Valori del PMV rispetto alla Categoria I per la stagione invernale (9-21 dicembre)	81
Grafico 84. Valori del PMV rispetto alla Categoria II per la stagione invernale (9-21 dicembre)	81
Grafico 85. Valori del PMV rispetto alla Categoria III per la stagione invernale (9-21 dicembre)	81
Grafico 86. Valori del PMV rispetto alla Categoria IV per la stagione invernale (9-21 dicembre)	81
Grafico 87. Modello PPD per la stagione invernale nelle ore d'occupazione (9-21 dicembre)	82
Grafico 88. Valori del PPD rispetto alla Categoria I per la stagione invernale (9-21 dicembre)	82
Grafico 89. Valori del PPD rispetto alla Categoria II per la stagione invernale (9-21 dicembre)	82
Grafico 90. Valori del PPD rispetto alla Categoria III per la stagione invernale (9-21 dicembre)	82
Grafico 91. Valori del PPD rispetto alla Categoria IV per la stagione invernale (9-21 dicembre)	82
Grafico 92. Categorie di PMV per la stagione invernale	83
Grafico 93. Medie di PPD per la stagione invernale	83
Grafico 94. Illuminamento orizzontale sul piano di lavoro per il periodo estivo (9 agosto-6 settembre)	84
Grafico 95. Illuminamento orizzontale sul piano di lavoro per il periodo invernale (9 dicembre-6 gennaio)	84
Grafico 96. UDI per il periodo estivo (9 agosto-6 settembre)	85
Grafico 97. UDI per il periodo invernale (9 dicembre-6 gennaio)	85
Grafico 98. DA per il periodo estivo (9 agosto-6 settembre)	85
Grafico 99. DA per il periodo invernale (9 dicembre-6 gennaio)	85

## Indice immagini

Immagine 01. Cronoprogramma delle fasi del lavoro di tesi	10
Immagine 02. Dimensioni per il calcolo del fattore di vista	22
Immagine 03. Caratteristiche della prestazione visiva	23
Immagine 04. Schema riassuntivo delle problematiche degli obiettivi e della metodologia del lavoro svolto	29
Immagine 05. Schematizzazione degli step del processo sperimentale	31
Immagine 06. Localizzazione del TEBE L <sup>2</sup> AB	33
Immagine 07. Disegni tecnici del TEBE L <sup>2</sup> AB (riferiti ad agosto 2023)	33
Immagine 08. Cronoprogramma della fase sperimentale	34
Immagine 09. Prospetto esterno delle due tecnologie di facciata	34
Immagine 10. Posizionamento della strumentazione per la raccolta dati nella stagione estiva	35
Immagine 11. Posizionamento della strumentazione per la raccolta dati nella stagione invernale	35
Immagine 12. Facciata A	36
Immagine 13. Facciata B	36
Immagine 14. Stazioni di Comfort	37
Immagine 15. Stazione di Comfort TESTO 400	37
Immagine 16. Programmazione Datalogger	37
Immagine 17. Datalogger DT600	37
Immagine 18. Raspberry Pi	37
Immagine 19. Multisensore Aircare	37
Immagine 20. Sensore termoigrometrico TESTO 175	37
Immagine 21. Lucmetro X-2000	37
Immagine 22. Navigatore (T <sub>a</sub> ) stagione estiva	42
Immagine 23. Navigatore (T <sub>a</sub> ) stagione invernale	43
Immagine 24. Navigatore (RH) stagione estiva	44
Immagine 25. Navigatore (RH) stagione invernale	45
Immagine 26. Navigatore (E <sub>o</sub> ) stagione estiva	46
Immagine 27. Navigatore (E <sub>o</sub> ) stagione invernale	47
Immagine 28. Navigatore (E <sub>v</sub> ) stagione estiva	48
Immagine 29. Navigatore (E <sub>v</sub> ) stagione invernale	49
Immagine 30. Navigatore (CO <sub>2</sub> ) stagione estiva	50
Immagine 31. Navigatore (CO <sub>2</sub> ) stagione invernale	51
Immagine 32. Schematizzazione delle caratteristiche dei livelli	56
Immagine 33. Diagramma solare TEBE L <sup>2</sup> AB	63
Immagine 34. Angolo zenitale e azimutale TEBE L <sup>2</sup> AB	63
Immagine 35. Schematizzazione del funzionamento del livello 1	67
Immagine 36. Schematizzazione del funzionamento del livello 2	67
Immagine 37. Schematizzazione del funzionamento del livello 3	67
Immagine 38. Schematizzazione del funzionamento del livello 3.1	68
Immagine 39. Schematizzazione del funzionamento del livello 4	68
Immagine 40. Schematizzazione del funzionamento del livello 5	68
Immagine 41. Griglia di punti per la facciata A	89
Immagine 42. Griglia di punti per la facciata B	89
Immagine 43. Modello spaziale L1-%h <sub>superamento</sub> -T <sub>op</sub> per la facciata A nella la stagione estiva	90
Immagine 44. Modello spaziale L5-%h <sub>superamento</sub> -T <sub>op</sub> per la facciata A nella la stagione estiva	90
Immagine 45. Modello spaziale L1-%h <sub>superamento</sub> -T <sub>op</sub> per la facciata B nella la stagione estiva	91
Immagine 46. Modello spaziale L5-%h <sub>superamento</sub> -T <sub>op</sub> per la facciata B nella la stagione estiva	91
Immagine 47. Modello spaziale L1-%h <sub>superamento</sub> -T <sub>op</sub> per la facciata A nella la stagione invernale	92
Immagine 48. Modello spaziale L5-%h <sub>superamento</sub> -T <sub>op</sub> per la facciata A nella la stagione invernale	92
Immagine 49. Modello spaziale L1-%h <sub>superamento</sub> -T <sub>op</sub> per la facciata B nella la stagione invernale	93
Immagine 50. Modello spaziale L5-%h <sub>superamento</sub> -T <sub>op</sub> per la facciata B nella la stagione invernale	93
Immagine 51. Modello spaziale L1-%h <sub>superamento</sub> -PMV per la facciata A nella la stagione estiva	94
Immagine 52. Modello spaziale L5-%h <sub>superamento</sub> -PMV per la facciata A nella la stagione estiva	94
Immagine 53. Modello spaziale L1-%h <sub>superamento</sub> -PMV per la facciata B nella la stagione estiva	95
Immagine 54. Modello spaziale L5-%h <sub>superamento</sub> -PMV per la facciata B nella la stagione estiva	95
Immagine 55. Modello spaziale L1-%h <sub>superamento</sub> -PMV per la facciata A nella la stagione invernale	96
Immagine 56. Modello spaziale L5-%h <sub>superamento</sub> -PMV per la facciata A nella la stagione invernale	96
Immagine 57. Modello spaziale L1-%h <sub>superamento</sub> -PMV per la facciata B nella la stagione invernale	97
Immagine 58. Modello spaziale L5-%h <sub>superamento</sub> -PMV per la facciata B nella la stagione invernale	97

## Indice tabelle

Tabella 01. Indici di performance termica a breve termine	17
Tabella 02. Range di temperatura operativa per ambienti climatizzati	18
Tabella 03. Range di PMV e limiti di PPD per ambienti climatizzati	20
Tabella 04. Indici di performance termica a lungo termine	20
Tabella 05. Percentuali di deviazione per le ore d'occupazione	22
Tabella 06. Fattori per il calcolo del fattore di vista	23
Tabella 07. Indici di performance luminosa a lungo termine	25
Tabella 08. Percentuali per la valutazione della performance luminosa a lungo termine	26
Tabella 09. Valori da aggiungere alla concentrazione esterna di CO <sub>2</sub> per il calcolo dei limiti di accettabilità	26
Tabella 10. Caratteristiche della strumentazione di misura	38
Tabella 11. Variabili e strumenti considerati per la valutazione dell'accuratezza	41
Tabella 12. Valori di T <sub>a</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato	42
Tabella 13. Valori di T <sub>a</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	42
Tabella 14. Valori di T <sub>a</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato	43
Tabella 15. Valori di T <sub>a</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	43
Tabella 16. Valori di RH per la stagione estiva nel giorno soleggiato	44
Tabella 17. Valori di RH per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	44
Tabella 18. Valori di RH per la stagione invernale nel giorno soleggiato	45
Tabella 19. Valori di RH per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	45
Tabella 20. Valori di E <sub>o</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato	46
Tabella 21. Valori di E <sub>o</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	46
Tabella 22. Valori di E <sub>o</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato	47
Tabella 23. Valori di E <sub>o</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	47
Tabella 24. Valori di E <sub>v</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato	48
Tabella 25. Valori di E <sub>v</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	48
Tabella 26. Valori di E <sub>v</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato	49
Tabella 27. Valori di E <sub>v</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	49
Tabella 28. Valori di CO <sub>2</sub> per la stagione estiva nel giorno soleggiato	50
Tabella 29. Valori di CO <sub>2</sub> per la stagione estiva nel giorno nuvoloso	50
Tabella 30. Valori di CO <sub>2</sub> per la stagione invernale nel giorno soleggiato	51
Tabella 31. Valori di CO <sub>2</sub> per la stagione invernale nel giorno nuvoloso	51
Tabella 32. Variabili e strumenti considerati per la valutazione del comfort termico	55
Tabella 33. Modelli e variabili necessarie per il calcolo della temperatura media radiante	56
Tabella 34. Delta modello T <sub>mr</sub>	58
Tabella 35. Delta modello ΔT <sub>mr</sub>	62
Tabella 36. Risultati metodo A per la stagione estiva (9-13 agosto)	71
Tabella 37. Risultati metodo A per la stagione invernale	73
Tabella 38. Risultati indice PMV per la stagione estiva (9-13 agosto)	80
Tabella 39. Risultati indice PMV per la stagione invernale	83

## Bibliografia

- Ahmad M.W., Moursheda M., Mundowb D., Sisinni M., Rezgui Y. (2016). "Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research". *Energy and Buildings*, volume 120, pp. 85-102.
- Altomonte S., Schiavon S., Kent M.G., Brager G., (2019). "Indoor environmental quality and occupant satisfaction in green-certified buildings". *Building Research e Information*, volume 47:3, pp. 255-274.
- ASHRAE. (2017). "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy". ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. ANSI.
- Brembilla E. et al. (2022). "Monitoring indoor environmental quality". CIBSE, TM68.
- British Standard. (2002). "Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities". BS EN ISO 7726:2001.
- British Standard. (2006). "Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria". BS EN ISO 7730:2005.
- British Standard. (2008). "Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics". BS 1EN ISO 15251:2007.
- British Standard. (2013). "Hygrothermal performance of building components and building elements — Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation — Calculation methods". BS EN ISO 13788:2012.
- British Standard. (2017). "Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods". BS EN ISO 6946:2017.
- British Standard. (2017). "Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods". BS EN ISO 13786:2017.
- British Standard. (2019). "Energy performance of buildings - Ventilation for buildings". BS EN 16798-1:2019.
- British Standard. (2019). "Energy performance of buildings - Ventilation for buildings". PD CEN/TR 16798-2:2019.
- British Standard. (2021). "Daylight in buildings". BS EN 17037:2018+A1:2021.
- British Standard. (2021). "Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places". BS EN 12464:2021.
- Crawford R.H., Stephan (eds.), *Living and Learning: Research for a Better Built Environment*: 49th International
- De Dear R., Parkinson T., Parkinson A. (2015). "Introducing the SAMBA indoor environmental quality monitoring system". 49th International Conference of the Architectural Science Association 2015, pp.1139–1148.
- Enescu D. (2017). "A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 79, pp. 1353-1379.
- European Commission. (2007). "Conclusioni della presidenza del Consiglio Europeo di Bruxelles, 7224/07". Art. 30.
- European Commission. (2010). "Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia G.U. L 153/13". Art. 1.
- Giovannini L., Favoino F., Lo Verso V. R. M., Pellegrino A., Serra V. (2018). "A simplified approach for the annual and spatial evaluation of the comfort classes of daylight glare using vertical illuminances". *Buildings*, volume 8 (n. 171).
- He Y., Arens W., Li N., Wang Z., Zhang H., Yongga A., Chenzhang Y. (2021). "Modeling solar radiation on a human body indoors by a novel mathematical model". *Building and Environment*, volume 187 (n.107421).
- International well building institute. (2016). "The Well building standard".
- Kantor N., Unger J. (2011). "The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment - the mean radiant temperature". *Central European Journal of Geosciences*, volume 3, pp. 90-100.
- Li P., Parkinson T., Schiavon S., Froese T.M., Dear R., Rysanek A., Staub-French S. (2020). "Improved long-term thermal comfort indices for continuous monitoring". *Energy and Buildings*, volume 224 (n. 110270).
- Mardaljevic J., Nabil A. (2005). "Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings". *Lighting Research and Technology*, volume 37, pp. 41-59.

- Meggens F., Kim A., Rucewicz S., Merchant C., Chen K., Teitebaum E. (2022). "Improving Mean Radiant Temperatures Sensing Using Multidirectional Non-Contacting Temperature Sensors to Avoid Convective Errors With Globe Thermometers". 2022 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEn).
- Miller C., Chua Y.X., Frei M., Quintana M. (2022). "Towards smartwatch-driven just-in-time adaptive interventions (JITAI) for building occupants". The 9th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation (BuildSys '22).
- Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP). (2023). "2022 Global Status Report for Buildings and Construction". Global Alliance for Buildings and Construction.
- Ruey-Lung H., Wei-An C. (2022). "Creating glazed facades performance map based on energy and thermal comfort perspective for office building design strategies in Asian hot-humid climate zone". *Applied Energy*, volume 311 (n. 118689).
- Santos Silvia A., Ghisi E., Lamberts R. (2016). "Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55". *Building and Environment*, volume 102, pp. 95-115.
- Tzempelikos A., Bessoudo M., Athienitis A.K., Zmeureanu R. (2010). "Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices - Part II: Thermal comfort simulation and impact of glazing and shading properties". *Building and Environment*, volume 45 (n.2517-2525).
- United State Commission. (1992). "Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici". Art.2.
- Van den Brom p., Meijer A., Visscher H. (2018). "Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics". *Building Research & Information*, volume 46, pp. 54-70.
- Walkenhorst O., Luther J., Reinhart C., Timmer J. (2002). "Dynamic annual daylight simulations based on one-hour and one-minute means of irradiance data". *Solar Energy*, volume 72, pp. 385-395.
- Wienold J., Christoffersen J. (2006). "Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras". *Energy and Buildings*, volume 38, pp. 743-757.
- Xie H., Clements-Croome D., Wang Q. (2017). "Move beyond greenbuilding: A focus on healthy, comfortable, sustainable and aesthetical architecture". *Intelligent Buildings International*, volume 9:2, pp. 88-96.
- Zhao Q., Lian Z., Lai D. (2021). "Thermal comfort models and their developments: A review". *Energy and Built Environment*, volume 2, pp. 21-33.

## Sitografia

- 3Bmeteo. (2024). "Storico Torino". <https://www.3bmeteo.com/meteo/torino/storico>. (24/01/2024).
- ARPA Piemonte. (2024). "Richiesta dati orari meteorologici". <https://www.arpa.piemonte.it/dati-ambientali/richiesta-dati-orari-meteorologici>. (24/01/2024).
- ENEA. (2024). "Atlante italiano della radiazione solare – Diagrammi e tabelle della posizione del sole". <http://www.solaritaly.enea.it/StrDiagrammiSolari/X12Mesi2.php>. (27/01/2024)
- European Commission. (2018). "Energy performance of buildings directive". [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en). (04/11/2023).
- Solar Topo. (2023). "Dom calcolatrice posizione - Azimuth e Zenith". <http://www.solartopo.com/orbita-solare.htm>. (15/01/2024)

## Ringraziamenti

*Dedico questo lavoro, emblematico dell'impegno dedicato alla mia formazione, a tutti coloro che mi hanno supportato, consigliato e riservato affetto.*

*Ai miei relatori che condividendo le loro conoscenze mi hanno infuso passione per questa materia, il vostro supporto ha permesso di ampliare capacità che non sapevo di avere e di concludere con gioia questo percorso.*

*A mia madre che per me è un esempio di forza e perseveranza, è grazie a te se oggi sono una donna forte e fiera di sé stessa, mi hai dato la possibilità e la convinzione di poter diventare qualsiasi cosa volessi essere credendo in me sempre e comunque, la tua fiducia e il tuo orgoglio sono la mia linfa vitale.*

*Alle mie sorelle che sono la mia tifoseria per eccellenza, grazie di essere sempre al mio fianco e di rendermi parte della vostra vita, poter crescere insieme a voi è un onore, siete il mio punto di riferimento, la casa in cui so di poter sempre tornare, questo traguardo è anche vostro.*

*A Charlie, il mio compagno di vita, grazie per aver visto in me quello che io non ero ancora in grado di vedere mi hai dato il coraggio per fare quello di cui avevo bisogno e senza te al mio fianco tutto questo sarebbe stato molto più faticoso, grazie per essere rimasto nonostante tutte le difficoltà, questa meta l'abbiamo raggiunta insieme e lo stesso sarà per la prossima.*

*A Mariassunta, mi hai insegnato che l'amicizia vera e incondizionata esiste e che a volte basta esserci, se non fossi nella mia vita non sarei chi sono e grazie per non avermi mai lasciato andare, sei parte di ogni parte di me.*

*A Chiara, mi hai permesso di capire chi ero quando mi sentivo meno di nulla, grazie a te ho capito quanto sia importante essere sé stessi senza mai scendere a compromessi, la tua forza è per me d'ispirazione.*

*A Giulio, compagno in questa bellissima avventura, non potrò mai ringraziarti abbastanza per questo, senza di te ci sarebbe un vuoto che non saprei come colmare, grazie di avermi sopportata e di avermi insegnato che per le persone giuste c'è sempre spazio.*

*A tutte i bellissimi esseri umani che ho avuto la fortuna di conoscere in questi anni, mi avete permesso di capire che circondandosi solo di chi ti merita tutto diventa più semplice.*

*A voi che mi avete fatto sentire a casa anche quando non ero mai stata così lontana.*

*A tutti coloro che hanno lasciato un segno in me.*

*A chi mi ha dato gli strumenti per trovare la mia strada.*

*A tutta la mia famiglia che anche da lontano riesce a riscaldarmi l'anima.*

*E in fine alla me stessa di sette anni fa che ha deciso che non era il momento di arrendersi ma di cominciare a lottare, senza la tua forza non sarei qui, felice di chi sono, innamorata di quello che faccio e circondata da chi sa apprezzarmi e volermi bene.*



