



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale Ingegneria Meccanica

**VALUTAZIONE DEL COMFORT TERMICO
DALL'ANALISI DI DATI OGGETTIVI E
SOGGETTIVI**

**EVALUATION OF THERMAL COMFORT FROM
ANALYSIS OF OBJECTIVE AND SUBJECTIVE DATA**

Relatore:

Prof. **Gianmarco Revel**

Tesi di Laurea di

Filippo Pacini

Correlatori:

Ing. **Giuseppe Pandarese**

Prof.ssa **Milena Martarelli**

A.A. 2019 / 2020

Sommario

Sommario	2
1-Introduzione	4
1.1-La teoria del comfort termico: Definizione di comfort.....	5
1.2- Il metodo di Fanger	6
1.3- Predicted Mean Vote (PMV)	9
1.4-Gli standard del comfort ASHRAE	11
2-Indici, strumenti e variabili del comfort	13
2.1- Indici di comfort.....	13
2.2-Panoramica sulle misurazioni del comfort.....	15
2.3-Variabili del comfort: Variabili Personali.....	17
2.4-Variabili del comfort: Variabili Ambientali	21
3-Valutazione del Comfort termico della biblioteca San Giovanni dall'analisi di dati ambientali reali.....	31
3.1-Acquisizione dei dati ambientali	31
3.2-Procedimento per il calcolo della temperatura media radiante	35
3.3-Struttura dello script MATLAB per lo studio dei dati ambientali.....	38
3.4-Scelta del valore di consumo metabolico	39
3.5-Generazione dei valori di isolamento termico del vestiario.....	40
3.6-Conclusioni dello studio dei dati ambientali oggettivi.....	44
4-La valutazione soggettiva del comfort termico: struttura del questionario e indici statistici.....	45
4.1-La normativa UNI EN ISO 10551.....	45
4.2- Costruzione delle scale di giudizio per un ambiente termico e condizioni di utilizzo	45
4.3-Costruzione di scale di giudizio percettivo, valutativo e preferenziale	46
4.4-Scale di accettabilità e tolleranza personale	47
4.5-Riassunto della struttura del questionario	49
4.6-Analisi dati e applicazione dei risultati	51
5-Valutazione del Comfort termico della biblioteca San Giovanni dall'analisi statistica di risposte a questionari	54
5.1-Struttura dell'indagine.....	54
5.2-Generazione delle risposte ai questionari.....	55

5.3-Risultati dell'analisi statistica.....	71
5.4-Conclusioni dello studio statistico delle risposte ai questionari	71
6-Conclusioni	73
7-Bibliografia e sitografia	74

1-Introduzione

A partire dagli studi effettuati da P. Ole Fanger alla fine degli '60, sono state emanate a livello europeo, nazionale e regionale numerose leggi e norme relative al risparmio energetico degli edifici, che indicano i criteri per la progettazione di nuove costruzioni o per gli interventi di riqualificazione energetica degli ambienti di lavoro.

Un ambiente termicamente non confortevole influenza in maniera significativa la produttività dei lavoratori, la valutazione del comfort termico-igrometrico risulta quindi di fondamentale importanza per garantire il benessere degli individui e ridurre i costi degli impianti di climatizzazione.

Il comfort termico è definito attraverso diverse accezioni come vedremo in seguito, ma comunque tutte riconducibili alla sensazione di benessere fisico e mentale che un individuo prova in un certo ambiente.

Tali tipi di sensazioni sono legate alle caratteristiche ambientali connesse al microclima interno e sono dette variabili oggettive. Allo stesso tempo occorre tenere in considerazione quelle che sono definite variabili soggettive, ovvero tutti quegli aspetti dipendenti dalle caratteristiche fisiche, biologiche ed emozionali degli individui.

Con lo scopo di garantire il benessere termico all'interno di ambienti lavorativi nasce il progetto EENSULATE (Development of innovative lightweight and highly insulating energy efficient components and associated enabling materials for cost-effective retrofitting and new construction of curtain wall facades), che mira a sviluppare delle soluzioni per l'isolamento dell'involucro degli edifici attraverso l'adozione di vetrate a basso costo e in grado di abbattere i consumi necessari al condizionamento interno.

A tale proposito è stata selezionata per l'installazione di questi vetri ad alte

prestazioni energetiche la biblioteca San Giovanni di Pesaro e sottoposta a monitoraggio attraverso l'acquisizione di dati ambientali.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è valutare il comfort termico della biblioteca dopo l'installazione della vetrata EENSULATE attraverso uno studio oggettivo dei dati ambientali raccolti, la costruzione di un questionario da poter sottoporre agli individui all'interno dell'ambiente lavorativo e la relativa simulazione di risposte per una valutazione statistica soggettiva sulla qualità del comfort.

1.1-La teoria del comfort termico: Definizione di comfort

Vengono fornite diverse definizioni di comfort, e per il nostro studio verranno prese a riferimento quelle fornite nelle normative UNI EN ISO 7730-2005 e ASHRAE 55-2004.

Nella UNI EN ISO 7730 viene definito come la "condizione che esprime la soddisfazione con l'ambiente termico circostante. L'insoddisfazione può essere causata dal disagio (discomfort) del corpo umano nel suo insieme in relazione al caldo o al freddo, o dal raffreddamento (o riscaldamento) di una particolare parte del corpo" [N1].

Nonostante il grande numero di parametri che la possono influenzare (ambientali e personali), alla base della sensazione termica del corpo umano c'è la temperatura degli organi interni che si attesta, in individui sani, sui 37° C, con una variazione di circa mezzo grado centigrado.

In ASHRAE 55-2004 si definisce che "Il comfort termico è la condizione che esprime la soddisfazione con l'ambiente termico circostante ed è stimato da una valutazione soggettiva" [N2].

Come si evince dalle definizioni precedenti, in generale la determinazione del comfort risulta alquanto complicata, in quanto il concetto non è meramente legato ad una evidenza scientifica. E' piuttosto un aspetto qualitativo condizionato da una preferenza personale, sociale e circostanziale, regolato da diverse variabili che possono essere riassunte in tre macro categorie:

-Variabili personali: metabolismo, stato di salute, vestiario, età, sesso, adattabilità, abitudini alimentari, posizione, status psicologico e sociologico.

-Variabili ambientali locali: correnti d'aria, stratificazione della temperatura dell'aria, emissioni di gas.

-Variabili ambientali globali: clima, temperatura esterna ed interna, umidità interna ed esterna, radiazione, qualità dell'aria.

Si definisce come comfort termo-igrometrico la personale soddisfazione verso il microclima (ovvero nei confronti dei livelli di temperatura e di umidità), ma essendo il concetto comfort esteso a tutta la sfera sensoriale umana è comune fare riferimento anche a:

-Comfort visivo: personale soddisfazione in termini illuminazione naturale, eventuale abbagliamento e resa cromatica.

-Comfort acustico: personale soddisfazione in termini di rumore e al campo sonoro.

-Comfort olfattivo: personale soddisfazione in termini di CO₂, composti organici volatili, polveri, virus e batteri contenuti nell'aria.

Il comfort termico rappresenta l'insieme dei parametri che condizionano gli scambi termici tra il soggetto e l'ambiente nello spazio circostante, e può essere giudicato dal soggetto come confortevole nel caso in cui l'equilibrio termico sia soddisfatto attivando meccanismi di termoregolazione minimizzando lo sforzo, equilibrato se per mantenere il bilancio termico è necessaria una vera e propria azione di termoregolazione ed infine disagiati nel caso in cui l'equilibrio termico non possa essere in alcun modo soddisfatto autonomamente.

1.2- Il metodo di Fanger

A partire dal 1970 Fanger mette a punto il primo modello di comfort, che pone le sue fondamenta sul concetto di bilancio energetico.

La sua teoria si costruisce a partire da due ipotesi fondamentali.

1.2.1-La prima ipotesi del Fanger

Fanger afferma che il Comfort può essere raggiunto solo in ambienti termici moderati.

A partire da questa ipotesi, gli ambienti possono essere distinti a seconda delle condizioni del microclima, che può essere distinto in tre categorie:

1) Moderato:

in queste condizioni di microclima il comfort termico può essere garantito, in quanto vengono rispettate le seguenti caratteristiche:

- I fattori ambientali sono omogenei;
- Gli scambi termici uomo e ambiente sono contenuti;
- Il livello di attività fisica basso e omogeneo tra gli utenti;
- Si è in presenza di uniformità nel vestiario;
- Non c'è la necessità specifica di fissare o limitare uno o più parametri ambientali.

2) Severo Caldo:

- Si è in presenza di alti valori di temperatura dell'aria, umidità relativa e velocità dell'aria;
- Le condizioni microclimatiche non uniformi (elevata variabilità zonale e temporale);
- Non uniformità del vestiario e delle attività svolte.

3) Severo Freddo:

- Bassi valori di temperatura dell'aria;
- Limitata variabilità spaziale e temporale per le condizioni ambientali;
- Uniformità nel vestiario e nei livelli di attività;
- Necessità di uno sforzo maggiore per acclimatarsi.

In entrambi i casi esistono vincoli sui parametri ambientali.

I meccanismi di termoregolazione del corpo umano in queste ultime due condizioni di microclima, vanno ad agire sull'accumulo e sulla dissipazione di calore (e quindi energia) interna del corpo umano, e questo si traduce nella necessità di minimizzare lo stress termico all'interno di questi ambienti per garantire il comfort.

1.2.2-La seconda ipotesi del Fanger

Per tradurre il concetto di comfort in forma ingegneristica occorre interpretare il corpo umano come un sistema termodinamico che converte il cibo (inteso come se fosse un combustibile) in lavoro e calore, proprio come accade alle macchine termiche inanimate: il surplus energetico non convertito in lavoro va disperso in ambiente mediante meccanismi di perdita di calore sensibile e latente.

Vengono ipotizzati tre meccanismi:

- perdita radiante verso superfici più fredde o un guadagno dalle superfici più calde;
- perdita per convezione verso l'aria più fredda o guadagno dall'aria più calda;
- perdita di calore per respirazione ossia dall'aria secca verso l'aria più fresca.

L'esperimento del Fanger prevedeva una popolazione di soggetti posti all'interno in una camera climatica controllata dove determinare la temperatura ambientale ideale per ogni combinazione di parametri ambientali in modo da delineare regole e correlazioni generali tra i parametri coinvolti.

Alcuni di questi parametri vengono fissati di volta in volta, tra cui la velocità dell'aria, la temperatura media radiante, l'umidità relativa, i livelli di attività e il vestiario. La temperatura interna viene variata fino ad annullare le percezioni di caldo e freddo verso il microclima circostante in modo da ottenere lo stato di neutralità termica.

L'utenza viene infine mantenuta passiva, costretta a non agire in alcun modo sull'ambiente o su sé stessa per adeguarsi alle condizioni ambientali ed unicamente chiamata a fornire un feedback qualitativo della propria percezione termica.

Da tale sperimentazione viene ricavata l'equazione del comfort (1):

$$S = M - W - R - C - C_K - E_d - E_{sw} - E_{ve} - C_{ve} = 0 \quad (1)$$

Dove:

S = Variazione unitaria di energia interna del corpo umano per unità di tempo;

M = Potenza unitaria prodotta dal metabolismo umano;

W = Potenza meccanica unitaria che il corpo umano cede all'ambiente;

R = Potenza termica unitaria dispersa per irraggiamento;

C = Potenza termica unitaria dispersa per convezione;

C_K = Potenza termica unitaria dispersa per conduzione;

E_d = Potenza termica unitaria dispersa per diffusione attraverso la pelle;

E_{sw} = Potenza termica unitaria dispersa per sudorazione attraverso la pelle;

$E_{ve} + C_{ve}$ = Potenza termica unitaria dispersa nella respirazione come calore latente (E_{ve}) e come calore sensibile (C_{ve}).

Questo parametro S viene definito da Fanger come “la differenza tra il calore interno prodotto e le perdite di calore verso l'ambiente attuale per un uomo mantenendo i valori del comfort per la temperatura della pelle e per la sudorazione a livello di attività attuale” [T1].

1.3- Predicted Mean Vote (PMV)

L'indice PMV predice il voto del comfort attribuito da un considerevole gruppo di individui per un set definito di condizioni ambientali, di valori metabolici (W/m^2) e della resistenza termica degli indumenti (clo).

Definisce la percentuale di persone che si aspetta di considerare accettabile l'ambiente circostante. La sensazione termica è quantificata per mezzo di una scala soggettiva che assegna ad ogni ambiente un voto, passando da molto freddo (-3) a molto caldo (+3), dove 0 rappresenta la neutralità termica ideale e $-0,5 < PMV < +0,5$ rappresenta il range indicativo della zona di comfort.

Diversi valori di accettabilità di PMV sono utilizzati nella ISO 7730 per classificare gli edifici in tre categorie A,B,C, ottenute introducendo un secondo indice definito PPD % (percentuale prevista di insoddisfatti).

Tali parametri possono essere schematizzati come segue.

CATEGORIA	PPD %	PMV
A	<6	-0,2 ÷ +0,2
B	<10	-0,5 ÷ +0,5
C	<15	-0,7 ÷ +0,7

E' possibile definire a questo punto le formule per il calcolo di PMV (equazioni 2, 3, 4, 5) come adottato nella UNI EN ISO 7730:

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \left\{ (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \times [5\,733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42 \times [(M - W) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} M (5\,867 - p_a) - 0,001\,4M (34 - t_a) - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (2)$$

Dove:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \left\{ 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (3)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} & \text{per } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}} \\ 12,1\sqrt{v_{ar}} & \text{per } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290I_{cl} & \text{per } I_{cl} \leq 0,078m^2\text{C}/W \\ 1,05 + 0,645I_{cl} & \text{per } I_{cl} > 0,078m^2\text{C}/W \end{cases} \quad (5)$$

Con:

M = potere metabolico [W/m^2];

W = potere del lavoro esterno [W/m^2];

I_{cl} = resistenza termica del vestiario [$m^2\text{C}/W$];

f_{cl} = fattore del vestiario = rapporto tra l'area vestita e l'area del corpo;

t_a = temperatura aria secca [$^{\circ}C$];

\bar{t}_r = temperatura media radiante [$^{\circ}C$];

v_{ar} = velocità dell'aria relativa (al corpo umano) [m/s];

p_a = pressione parziale del vapore acqueo [Pa];

h_c = coefficiente dello scambio di calore per convezione [$W/m^2\text{C}$];

t_{cl} = temperatura della superficie vestita [$^{\circ}C$];

Il PPD Percentage of People Dissatisfied index (Percentuale prevista di insoddisfatti) corrisponde alla percentuale delle persone che votano al di fuori del range del PMV da -1 (leggermente fresco) a +1 (leggermente caldo). Il rapporto tra gli indici PMV e PPD è riportato nel grafico sottostante insieme alla formula per il calcolo di quest'ultimo.

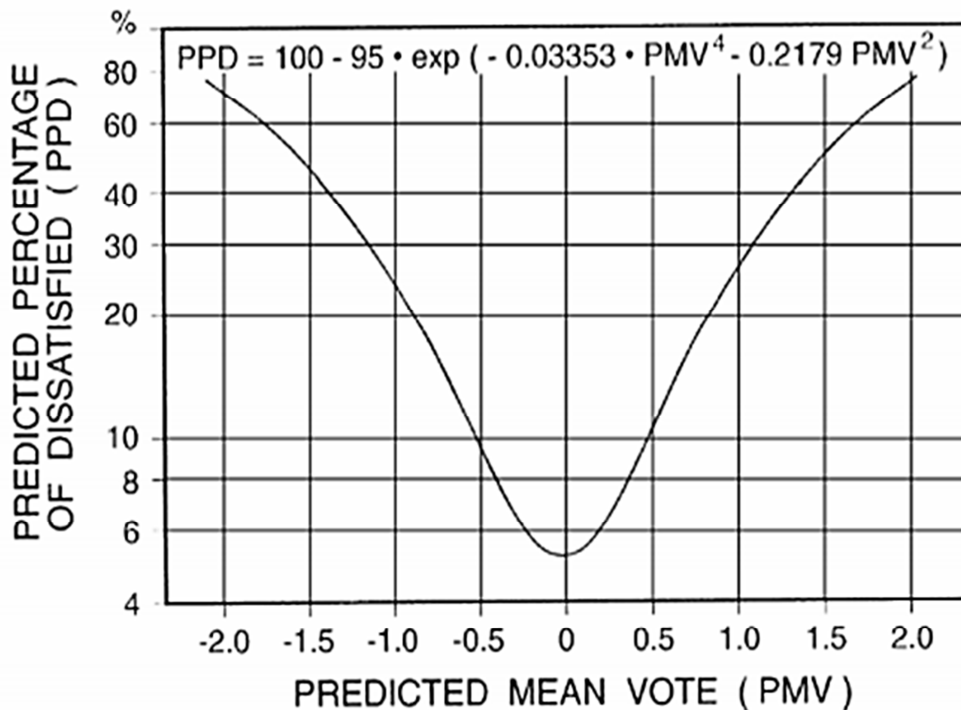


Figura 1-Andamento del PPD in relazione al PMV; Equazione per il calcolo del PPD.

Riferimento:

["http://ceae.colorado.edu/~brandem/aren3050/docs/ThermalComfort.pdf"](http://ceae.colorado.edu/~brandem/aren3050/docs/ThermalComfort.pdf)

1.4-Gli standard del comfort ASHRAE

In ASHRAE viene sviluppato uno standard per descrivere i requisiti di comfort negli edifici, ed è noto come “ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environmental: condizioni per l'occupazione umana”[NN2]. Lo scopo di questi standard è specificare le combinazioni di fattori ambientali termici interni e fattori personali che produrranno condizioni termiche e ambientali accettabili per la maggioranza degli occupanti all'interno dell'ambiente lavorativo. Una delle sue caratteristiche più importanti è la “Comfort Zone ASHRAE”, rappresentata in figura 2. Lo Standard consente un approccio grafico per la valutazione del comfort nelle situazioni in cui gli occupanti hanno livelli di attività traducibili in tassi metabolici compresi tra 1.0 [met] e 1.3 [met] e dove si indossano indumenti che forniscono tra gli 0.5 [clo] e 1.0 [clo] di isolamento termico. Anche in questo caso la zona di comfort si basa sui valori PMV compresi tra -0,5 e +0,5.

Nel diagramma del benessere proposto dall'ASHRAE è indicata la scala della cosiddetta “nuova temperatura effettiva” ET* che viene definita come la temperatura a bulbo secco di una cavità nera col 50% di umidità relativa

in cui un individuo scambia una quantità di energia pari a quella nell'ambiente considerato. Il campo di accettabilità è definito da temperature effettive ET^* comprese tra 22 °C e 25,5 °C e da valori di pressione parziale del vapor d'acqua compresi tra 4 e 14 mm Hg (che corrispondono, per le temperature considerate, a valori di umidità relativa nell'intervallo 20÷65%). Le linee a ET^* costante sono state derivate analiticamente dall'equazione di bilancio e sono luoghi di punti a ugual percentuale di superficie corporea interessata dal fenomeno.

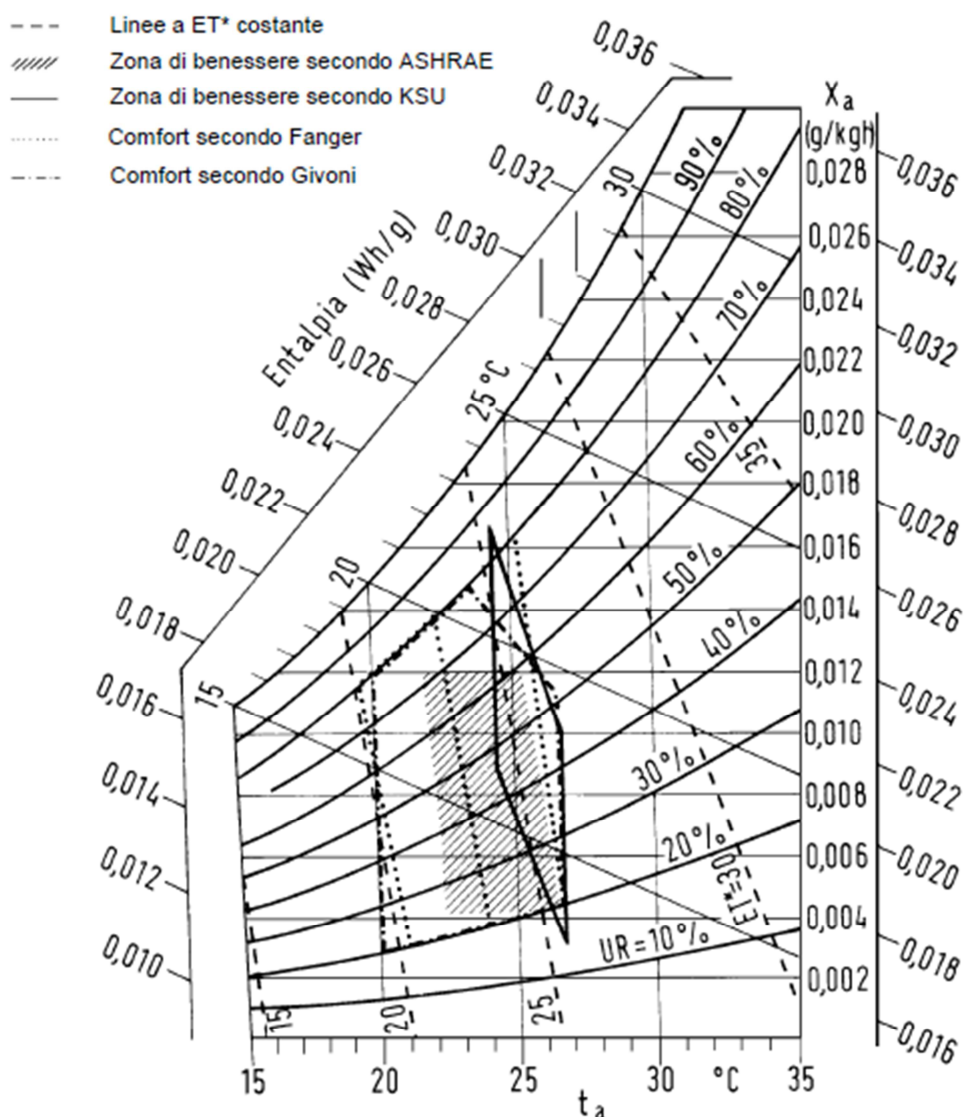


Figura 2- Comfort Zone ASHRAE. Riferimento: ASHRAE Standard 55-2004
Thermal Environmental: "condizioni per l'occupazione umana."

2-Indici, strumenti e variabili del comfort

2.1- Indici di comfort

Ci si pone l'obiettivo di riuscire a valutare la distanza tra il comfort e le condizioni reali.

Vengono a tale scopo introdotti di seguito gli indici di comfort, ovvero l'insieme di parametri usati per descrivere le condizioni di stress termico e di comfort contenente diversi contributi delle variabili in un singolo valore con l'obiettivo di una valutazione significativa e soddisfacente.

I limiti di range accettabili sono determinati su base statistica, e possono essere classificati attraverso tre differenti tipi di scale:

- I. SCALA SPAZIALE, comprendente indici di stress e comfort globale e gli indici di discomfort locale.
- II. SCALA TECNICA, comprendente gli indici razionali, gli indici empirici e gli indici diretti.
- III. SCALA TEMPORALE, comprendente gli indici attuali e quelli a lungo termine.

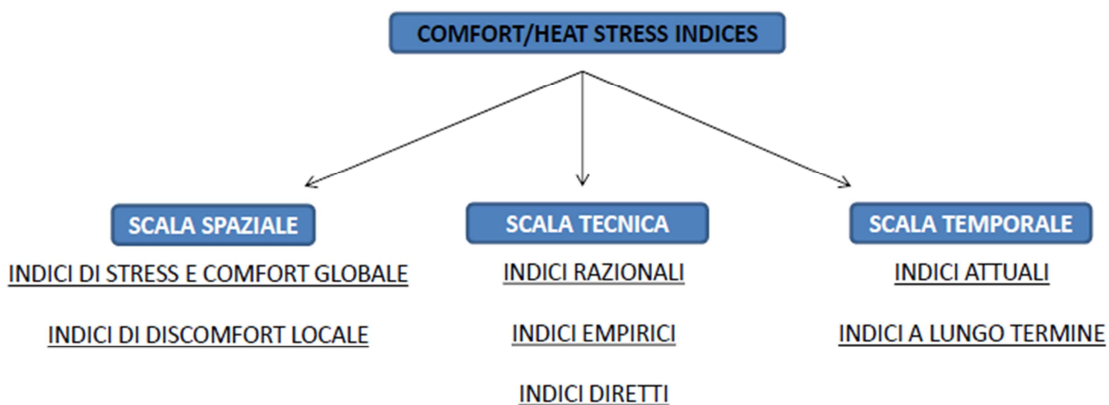


Figura 3- Schema riassuntivo scale del comfort. Riferimento: Università Politecnica delle Marche - Lezioni di Impianti Termotecnici, Prof. Costanzo di Perna.

I. SCALA SPAZIALE

1) Indici di stress e comfort globale:

Come indice di comfort si fa riferimento ad un singolo valore che descrive

la sensazione termica in ambienti moderati dove l'insoddisfazione è il rischio principale, mentre viene definito indice di stress termico il singolo valore che integra l'effetto dei parametri di base in un ambiente termico severo (caldo o freddo) con lo sforzo termico (o disagio termico) sperimentato direttamente dall'individuo. Molti di questi indici sono stati sviluppati per stimare il surriscaldamento estivo e solo pochi di loro trattano con certezza il discomfort invernale.

La definizione "globale" è introdotta poiché le quattro variabili ambientali sono considerate uniformi nello spazio.

2) Indice di discomfort locale:

un singolo valore definisce l'insoddisfazione umana nel vivere l'ambiente, presa in considerazione la reale distribuzione spaziale delle variabili ambientali (locale).

II. SCALA TECNICA

1) Indici razionali:

Si basano su calcoli che coinvolgono l'equazione di bilancio termico e le relazioni statistiche tra i parametri psicologici, personali e ambientali e sono generalmente ottenuti in una camera termostatica con una larga serie di condizioni ambientali.

Prevedono un alto sforzo computazionale ed alcune variabili sono generalmente presunte o si assumono costanti (gli indici PMV e PPD ricadono in questa categoria)

2) Indici empirici:

Basati sull'idea che "conditions of equal environmental stress are those which produce an equal physiological strain".

Gravano sui parametri di comfort secondo il loro effetto sui soggetti umani (come ad esempio la sudorazione) e molti si basano sul metodo dell'inchiesta e sull'analisi di regressione. Le differenze tra gli indici di questo gruppo dipendono dal numero e dal tipo dei parametri presi in considerazione.

3) Indici diretti:

Basati su misurazioni di variabili personali e ambientali, generalmente riferiti ad analisi di regressione lineare. Essi non riguardano l'effetto fisiologico prodotto sugli individui, e le differenze tra gli indici di questa famiglia sono il numero e il tipo di parametri ambientali presi in considerazione, oltre alla possibilità di utilizzare i valori per valutare l'effetto del calore equivalente di ogni parametro.

Le prime due tipologie risultano più difficoltose da implementare nei luoghi di lavoro in quanto le variabili sono molteplici e richiedono misurazioni invasive.

La terza tipologia è più facilmente applicabile e generalmente preferibile: essa richiede l'utilizzo di una stazione di monitoraggio.

III. SCALA TEMPORALE

1) Indici attuali:

Sono basati su misurazioni a spot (calcoli in tempo reale) e possono essere utilizzati per prendere decisioni di controllo/test algorithms/monitor sul comportamento istantaneo dell'edificio.

2) Indici di lungo termine:

E' un nuovo tipo di "indice di discomfort" che è stato proposto nella letteratura scientifica, dalle normative e dalle linee guida. Ha l'obiettivo di stimare la qualità del comfort termico considerando tutte le zone di un edificio in un lasso determinato lasso di tempo. Possono essere calcolati da dati simulati o misurati, utilizzati per valutare la performance con strategie di controllo e per confrontare il comportamento ergonomico-energetico dell'edificio durante il corso dell'anno.

2.2-Panoramica sulle misurazioni del comfort

Schema input-output di un sensore:

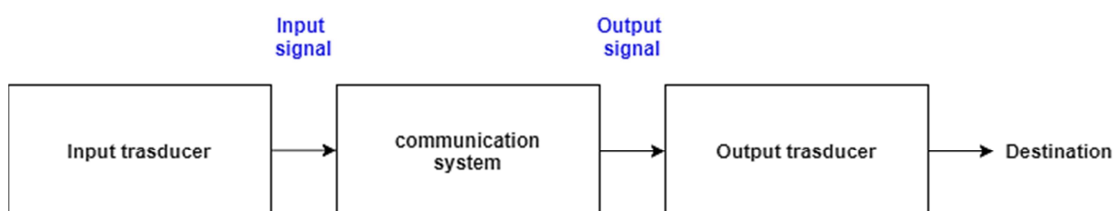


Figura 4-Schema input-output di un sensore.

SENSIBILITA': minimo input di parametro fisico che può generare un significativo cambiamento di output, ovvero la pendenza della curva caratteristica degli output DY/DX .

RANGE: intervallo di valori massimi e minimi da applicare ai parametri che possono essere misurati.

OFFSET: output che rappresenta la differenza (o scostamento) tra il valore attuale (reale) di output e lo specifico output sotto qualche particolare set di condizioni (la differenza dovrebbe essere nulla).

COSTANTE TEMPO (T o τ): il tempo necessario per raggiungere il 63% del valore finale in risposta ad un cambiamento di passo dell'input. Questo dipende dal tipo di sensore (di massa, di area superficiale, sonde protettive) e dalle caratteristiche dell'ambiente, come la velocità dell'aria, o la radiazione.

TEMPO DI RISPOSTA (T_r): tempo impiegato per raggiungere una percentuale prefissata del valore finale, all'interno di una certa banda di tolleranza (generalmente $\pm 5\%$) relativa al nuovo valore.

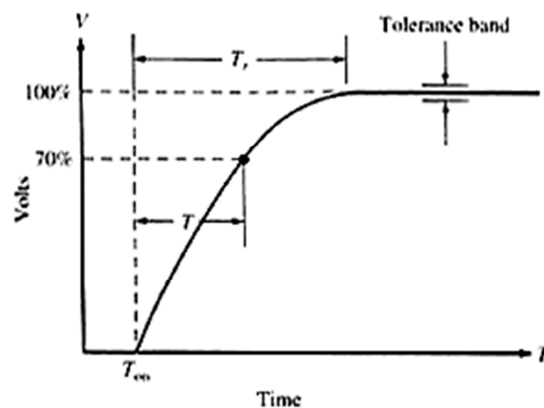


Figura 5-Grafico tempo di risposta. Riferimento: Università Politecnica delle Marche - Lezioni di Impianti Termotecnici, Prof. Costanzo di Perna.

ACCURATEZZA: la massima differenza che esiste tra il valore reale (che deve essere misurato) e il valore indicato all'uscita del sensore. Può essere espressa in percentuale del fondo scala o in termini assoluti oppure come percentuale della misura. Dipende dalle caratteristiche interne

dell'apparecchiatura e dal metodo utilizzato per la calibrazione. L'accuratezza può essere espressa attraverso una percentuale relativa ad una scala o in termini assoluti.

PRECISIONE: esprime la distribuzione dei valori misurati attorno ai valori medi misurati. Maggiore precisione dello strumento comporta maggiore ripetibilità delle misurazioni sperimentali, quindi risultati più affidabili.

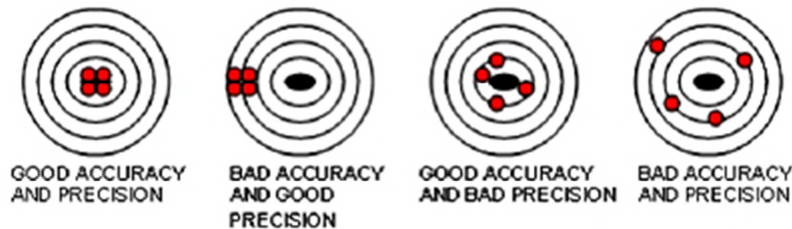


Figura 6-Rappresentazione del concetto di precisione di un sensore. Riferimento: Università Politecnica delle Marche - Lezioni di Impianti Termotecnici, Prof. Costanzo di Perna.

RISOLUZIONE: il più piccolo cambiamento di incremento del parametro di input che può essere dedotto nei segnali di output. Come per l'accuratezza, la risoluzione può essere espressa o come proporzione rispetto alla scala di lettura o in termini assoluti.

2.3-Variabili del comfort: Variabili Personali

2.3.1-Variabili Personali: Tasso metabolico

Il metabolismo umano può essere strutturato su tre livelli:

-Tasso metabolico basale (BMR): Minima energia richiesta per vivere. Le condizioni di misurazione sono che il soggetto sia sveglio, senza cibo, non in movimento.

-Tasso metabolico rimanente (RMR), ottenuto dalla combinazione di BMR, Metabolismo a riposo, metabolismo per risveglio.

-Percentuale metabolica di esercizio(EMR) ottenuta come combinazione di RMR e metabolismo a lavoro (corpo in movimento).

Dalla ASHRAE 55-2010 [N3], viene definito tasso metabolico il livello di potenza dei processi chimici che intervengono all'interno di un organismo, responsabile della trasformazione dell'energia del cibo in lavoro meccanico

e calore.

Si esprime usualmente come il rapporto tra la potenza per unità di area della superficie del corpo, con un'unità fittizia, MET, definita come: 1 met = 58.2 W/m² tasso metabolico di una persona standard (area superficiale di 1.8 m²) in posizione seduta. Di seguito sono riportati i valori di consumo metabolico per tipo di attività svolta.

Attività	Energia Metabolica	
Stare distesi e riposati	46 W/m ²	0,8 (met)
Stare seduti e rilassati	58 W/m ²	1,0 (met)
Riparare orologi	65 W/m ²	1,1 (met)
Stare in piedi rilassati	70 W/m ²	1,2 (met)
Attività sedentaria (ufficio, scuola, laboratorio)	70 W/m ²	1,2 (met)
Guidare un'auto	80 W/m ²	1,4 (met)
Grafico – Rilegatore	85 W/m ²	1,5 (met)
Stare in piedi, esercitando un'attività leggera (shopping, laboratorio, industria leggera)	93 W/m ²	1,6 (met)
Insegnamento	95 W/m ²	1,6 (met)
Lavoro domestico – Tagliarsi la barba, lavarsi e vestirsi	100 W/m ²	1,7 (met)
Camminare in piano, 2 km/h	110 W/m ²	1,9 (met)
Stare in piedi, attività media (commesso, lavoro domestico)	116 W/m ²	2,0 (met)
Industria di costruzioni – disposizione di mattoni (blocchi di 15,3 kg)	125 W/m ²	2,2 (met)
Stare in piedi lavando i piatti	145 W/m ²	2,5 (met)
Lavoro domestico – Raccogliere foglie dal suolo	170 W/m ²	2,9 (met)
Lavoro domestico – lavare a mano e stirare (120-220W/m ²)	170 W/m ²	2,9 (met)
Industria siderurgica – Rfinire con un martello pneumatico	175 W/m ²	3,0 (met)
Industria edile – Colare il calcestruzzo	180 W/m ²	3,1 (met)
Camminare in piano, 5 km/h	200 W/m ²	3,4 (met)
Attività forestale – Segare controfilo con una sega azionata da un uomo	205 W/m ²	3,5 (met)
Agricoltura – arare con i cavalli	235 W/m ²	4,0 (met)
Industria di costruzione – caricare la carriola con pietre e calce	275 W/m ²	4,7 (met)
Sport – Pattinaggio	360 W/m ²	6,2 (met)
Agricoltura – Scavare con una vanga (24 colpi al minuto)	380 W/m ²	6,5 (met)
Sport – Sciare in piano	405 W/m ²	7,0 (met)
Attività forestale – Lavorare con l'ascia (2 kg, 33 colpi/minuto)	500 W/m ²	8,6 (met)
Sport – Corsa, 15 km/h	550 W/m ²	9,5 (met)

Figura 7-Valori di consumo metabolico per tipo di attività svolta. Riferimento: INNOVA: Air tech instruments: “Il comfort termico”.

2.3.2-Variabili personali: Isolamento termico del vestiario

La dissipazione del calore dipende dall'area superficiale del corpo (rapporto tra superficie e volume), dal numero e dalle proprietà di resistenza degli strati di vestiario (funzione del materiale, spessore e grandezza dell'indumento).

La resistenza del vestiario è usualmente definita in Clothing “CLO”,

un'unità così definita:

1 clo = 0.155 m²·K/W corrispondente a pantaloni, camicia e giacca.

I valori di resistenza del vestiario per altri esempi di combinazione standard o per singoli indumenti si possono trovare in ASHRAE 55, e sono riportati di seguito.

Abbigliamento		Isolamento termico	
		<i>I_{cl}, Clo</i>	<i>m²K/W</i>
Nudo		0	0
Biancheria intima – Parte inferiore	Collant	0.02	0.003
	Mutande	0.03	0.005
	Slip	0.04	0.006
	Boxer mezza gamba di lana	0.06	0.009
	Boxer lunghi	0.1	0.016
Biancheria intima – Parte superiore	Reggiseno	0.01	0.002
	Canottiera senza maniche	0.06	0.009
	T-shirt	0.09	0.014
	Maglia maniche lunghe	0.12	0.019
	Body in nylon	0.14	0.022
Maglie	Top	0.06	0.009
	Maglia a manica corta	0.09	0.029
	Camicia leggera maniche lunghe	0.15	0.023
	Maglia leggera a maniche lunghe	0.20	0.031
	Maglia a maniche lunghe	0.25	0.039
	Maglia di flanella a maniche lunghe	0.30	0.047
	Maglia maniche lunghe dolcevita	0.34	0.053
Pantaloni	Shorts	0.06	0.009

Abbigliamento		Isolamento termico	
		I_{cb}, Clo	$m^2 K/W$
	Shorts da passeggio	0.11	0.017
	Pantaloni leggeri	0.20	0.031
	Pantaloni in cotone	0.25	0.039
	Pantaloni di flanella	0.28	0.043
	Tuta	0.28	0.043
Completi	Completo quotidiano, cintura	0.49	0.076
	Completo da lavoro leggero	0.50	0.078
Completi ad alto isolamento	Strati multipli, imbottito	1.03	0.160
	Pelliccia sintetica	1.13	0.175
Maglioni	Gilet senza maniche	0.12	0.019
	Maglione fino	0.20	0.031
	Maglione fino a collo alto	0.26	0.040
	Maglione spesso	0.35	0.054
	Maglione spesso a collo alto	0.37	0.057
Giacche	Gilet	0.13	0.020
	Giacca leggera estiva	0.25	0.039
	Giacca smocking	0.30	0.047
	Giacca	0.35	0.054
Cappotti e Soprabiti	Stradi di maglioni	0.52	0.081
	Piumino	0.55	0.085
	Cappotto	0.60	0.093
	Parka	0.70	0.109
Altri capi	Calzini	0.02	0.003
	Scarpe con suola	0.02	0.003

Abbigliamento		Isolamento termico	
		I_{cb}, Clo	$m^2 K/W$
	sottile		
	Pantofole	0.03	0.005
	Calzini spessi alla caviglia	0.04	0.006
	Calzini spessi fino al ginocchio	0.05	0.008
	Stivaletti	0.05	0.008
	Calzini spessi lunghi	0.10	0.016
Gonne, vestiti	Gonna leggera 15 cm. Sopra al ginocchio	0.01	0.016
	Gonna leggera 15 cm. Sotto al ginocchio	0.18	0.028
	Gonna pesante fino al ginocchio	0.25	0.039
	Vestito leggero senza maniche	0.25	0.039
	Vestito invernale lungo con maniche	0.40	0.062

Figura 8-Tabella valori di isolamento termico del vestiario. Riferimento: ["https://www.engineeringtoolbox.com/clo-clothing-thermal-insulation-d_732.html"](https://www.engineeringtoolbox.com/clo-clothing-thermal-insulation-d_732.html)

2.4-Variabili del comfort: Variabili Ambientali

I fattori ambientali che vengono presi in considerazione nella valutazione del comfort sono temperatura dell'aria secca, umidità, velocità dell'aria e la temperatura media radiante.

2.4.1-Temperatura dell'aria secca

Con temperatura dell'aria (o a bulbo secco) si definisce temperatura media dell'aria che circonda l'occupante. Lo strumento di misurazione utilizzato è un termometro a bulbo secco, in generale si fa riferimento a strumenti di misura come termometri ad espansione, termocoppie e termo-resistenze (o

termometri a resistenza).

Di seguito sono riportati i principali dispositivi di misurazione per la temperatura dell'aria secca.

-Termometro ad espansione: Il contenuto (solido o liquido) in un termometro è normalmente incluso in una colonnina di vetro (o plastica) con l'area della sezione trasversale costante. All'aumento della temperatura si ottiene un aumento del volume del liquido, e come conseguenza dell'altezza del liquido nella colonnina (Δh è proporzionale all'aumento della temperatura).

-Termocoppia: Operano secondo il principio per cui in un circuito costituito dalla connessione di due metalli diversi si produce una differenza di potenziale elettrico (Seebeck effect) qualora le due estremità siano poste a temperatura diversa (Peltier effect) con un minimo proporzionale, indipendente dalla lunghezza o dalla sezione del conduttore (Thomson effect).

-RTD: La termo-resistenza è un sensore di temperatura che sfrutta la variazione della resistività di alcuni materiali al variare della temperatura. La resistenza elettrica di un materiale (generalmente platino, nickel, e rame) cambia con la temperatura circostante attraverso una legge prevedibile. Applicando alla RTD una corrente costante e misurando la tensione risultante è possibile calcolare la resistenza della RTD e conseguentemente calcolare la temperatura.

2.4.2-Umidità (RH, umidità relativa)

In accordo con la teoria di Fanger, l'umidità ha un'influenza minore sulla percezione del comfort termico complessivo, ma condizionando la qualità dell'aria, gioca un ruolo chiave nell'equilibrio del calore umano come ad esempio l'inibizione diretta sulla percentuale di evaporazione del sudore.

Per alti livelli di RH(>70%) e bassi livelli di RH(<20%) si hanno ambienti in genere poco sani.

Il range raccomandato ha dei valori di umidità relativa che si attestano

intorno al 30-60% in edifici con aria condizionata, con livelli maggiori nei bagni e livelli minori nei musei o in presenza di speciali dispositivi elettronici.

I principali dispositivi di misurazione per l'umidità relativa sono gli igrometri relativi, gli igrometri elettrici e gli psicometri.

1) Igrometri relativi:

-Igrometri a tensione di capello: La lunghezza dei capillari cambia con l'umidità, il cambiamento della lunghezza può essere amplificato da un meccanismo e/o indicato su un quadrante o in scala.

-Igrometri a specchio raffreddato: Il campione di gas fluisce su di uno specchio metallico propriamente placcato con un metallo inerte (iridio, rubidio, nichel, o oro) per prevenire l'offuscamento e l'ossidazione e lo specchio è raffreddato (da un refrigerante termoelettrico) finché non inizia la formazione della rugiada. Il meccanismo ottico elettronico capta la condensazione sulla superficie dello specchio: la luce, emessa da un LED, illumina la superficie ed è parzialmente ricevuta da un rilevatore fotoelettrico, e la variazione di PD output è usato come reazione elettronica da una pompa di calore termoelettrica per mantenere un equilibrio dinamico tra evaporazione e condensazione sullo specchio, misurando così da vicino il punto di rugiada.

-Igrometri a cloruro di litio: Consiste in un tubo sottile ed isolato ricoperto con un panno impregnato con sale igrometrico al cloruro di litio (LiCl). Gli elettrodi bifilari elicoidali sono collegati ad un alimentatore elettrico a bassa tensione. Una resistenza interna permette di calcolare il valore della temperatura dell'intero sistema. Una corrente applicata agli elettrodi scalda il tubo e l'acqua assorbita (dall'aria) evapora e cristallizza. In questo modo la conducibilità decresce, l'intensità tra gli elettrodi decade e la nuova umidità può essere assorbita e si genera nuovamente l'evaporazione finché non si stabilisce un equilibrio: la temperatura interna finale dipende unicamente dalla pressione del vapore acqueo dell'aria ricavato dalle misurazioni dirette della temperatura del punto di rugiada o dell'umidità

assoluta.

2) Igrometri elettrici:

-Igrometri elettrici capacitivi: Un condensatore in grado di tradurre in segnali elettrici una variazione di umidità. La capacità C dipende dalla permittività dielettrica (ovvero il comportamento di un materiale dielettrico in presenza di un campo elettrico) ϵ dello strato polimerico tra le due piastre conduttive parallele che cambiano significativamente con l'assorbimento/rigetto dell'umidità

-Sensore gravimetrico: Piatti al quarzo piezoelettrici, rivestiti con materiale igroscopico con frequenza di risonanza nel range dell'Mhz.

La procedura di misurazione prevede un segnale elettrico è applicato su entrambi i lati dell'elettrodo che inizia a vibrare producendo espansione e compressione.

3) Psicometri:

-Psicometro di Assman: Un sistema di due termometri uno secco e uno umido ed eventualmente un ventilatore.

Un termometro a bulbo secco ricoperto da un panno di cotone bagnato mantenuto costantemente imbevuto con acqua distillata (termometro a bulbo umido), mentre il ventilatore serve per mantenere i bulbi a contatto con aria sempre rinnovata. L'evaporazione provoca un abbassamento della temperatura assorbendo calore, la temperatura del termometro con il bulbo bagnato è inferiore a quella segnata dall'altro termometro. La differenza dei valori (differenza psicometrica) è proporzionale all'evaporazione, cioè è tanto più grande quanto meno umida è l'aria ambiente. RH può essere ricavato da idonee carte psicometriche o come funzione della differenza tra queste due temperature.

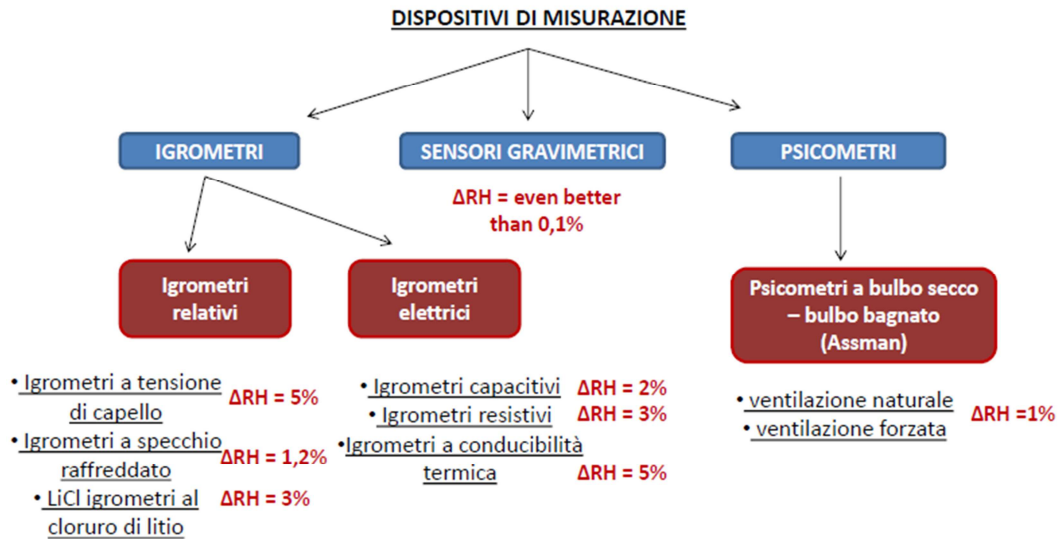


Figura 9-Schema riassuntivo dei dispositivi di misurazione per umidità relativa.
Riferimento: Università Politecnica delle Marche - Lezioni di Impianti Termotecnici,
Prof. Costanzo di Perna.

2.4.3-Velocità dell'aria

Questa grandezza quantifica il movimento dell'aria in termini di magnitudine e direzione.

Viene descritta da:

- v_a = valore medio (la media delle misurazioni del periodo, che è, in accordo con ASHRAE 55 Standard, lo stesso proposto per la temperatura dell'aria);

-SD = deviazione standard: Dove v_{a_i} rappresenta il valore istantaneo della velocità:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_{a_i} - v_a)^2} \quad (6)$$

-L'intensità della turbolenza "TU" è il rapporto tra la deviazione e il valore medio:

$$TU = \frac{SD}{v_a} \times 100 \quad (7)$$

Lo strumento utilizzato per la misurazione della velocità dell'aria è l'anemometro. Di seguito si riportano le principali tipologie di anemometro ed il loro sistema di funzionamento.

-Anemometro a sfera calda omnidirezionale. E' il più usato nella pratica e consiste in una sfera calda che scambia elettricamente calore con l'ambiente circostante attraverso uno scambio convettivo.

-Anemometro a filo caldo. Il sensore è strutturato ponendo un ponte di Wheatstone con sui lati opposti due sensori: un sensore della velocità dell'aria, scaldato da una temperatura elevata (relativa all'aria circostante) per mezzo di un controllo elettronico e un sensore di compensazione di temperatura.

Il principio di funzionamento prevede un circuito che genera tensione ai punti A e B in maniera costante tramite un amplificatore operazionale.

il flusso d'aria raffredda il sensore della velocità, con conseguente diminuzione della resistenza e l'amplificatore operazionale risponde immediatamente fornendo più potenza in cima al ponte per mantenere la tensione in equilibrio tra i punti A e B. Quanto più i flussi investono il sensore tanto più è richiesta potenza per mantenere il ponte in equilibrio.

La potenza richiesta in cima al ponte, per mantenere l'equilibrio, è relativa alla velocità dell'aria.

-Anemometro rotante a tazza. Un generatore elettrico connesso all'asse verticale, equipaggiato da 3 larghe "cups" che captano il vento e fanno roteare il generatore. Il generatore è connesso ad un circuito elettronico che restituisce una lettura immediata della velocità del vento (possibilmente tramite un display digitale).

-Anemometri rotanti a propulsori. Come turbine di vento in miniatura, utilizzano piccoli propulsori per dare potenza ai loro generatori (come la dinamo della bicicletta) al posto delle tazze girevoli.

-Anemometri ultrasonici. Prevede due o tre paia di trasmettitori del suono e ricevitori sono posizionati perpendicolarmente l'un l'altro. Ogni trasmettitore produce costantemente un suono ad alta frequenza al suo rispettivo ricevitore.

La velocità dell'aria ha effetto sulla velocità della sonda e i circuiti elettronici all'interno dell'anemometro misurano il tempo impiegato dal

suono per andare dal trasmettitore al suo rispettivo ricevitore misurando la differenza di velocità del raggio e in base a ciò si ricava la velocità con cui soffia il vento.

-Anemometri interferometrici. utilizzano i raggi di luce invece degli ultrasuoni applicando il principio dell'interferometria: un dispositivo ottico (uno specchio semi-argentato) divide il raggio laser a metà e il raggio di riferimento si muove lungo un percorso indipendente mentre il raggio di misurazione interagisce con il flusso d'aria provocando alterazione di fase (schema di vibrazione) delle onde di luce. Ricombinando i due raggi laser e sovrapponendo gli schemi di luce, lo spostamento di fase da luogo ad un set di frange di interferenza, e tale spazio tra le frange può essere associata alla velocità dell'aria.

2.4.4-La temperatura media radiante e il fattore di vista

Poiché gli indici fino ad ora citati ignorano l'effetto della radiazione circostante, occorre introdurre un nuovo parametro fondamentale. La temperatura media radiante [$^{\circ}\text{C}$] è la temperatura uniforme di un ambiente fittizio nel quale un soggetto scambierebbe per irraggiamento lo stesso flusso termico che scambia nell'ambiente reale e viene calcolata come:

$$T_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_n^4 F_{p-n} \quad (8)$$

Dove

T_r è la temperatura media radiante, in kelvin;

T_n è la temperatura della n-esima superficie, in kelvin;

F_{p-n} il fattore di vista tra la persona e l'n-esima superficie.

Considerando tipicamente alta l'emissività dei materiali da costruzione.

La linearizzazione si preferisce quando sono evidenziate differenze di temperatura relativamente piccole tra le superfici e l'ambiente:

$$T_r = T_1 F_{p-1} + T_2 F_{p-2} + \dots + T_N F_{p-N}. \quad (9)$$

Non essendo nota la direzione con cui la persona “vede” la superficie, direzione che spesso cambia, è raccomandato l’uso dei diagrammi omni-direzionali. La posizione della persona influenza la temperatura media radiante.

Il calore per irraggiamento dalle superficie circostanti è funzione della temperatura, dell'emissività ε , ovvero una frazione di energia irraggiata da una specifica superficie rispetto all’energia irraggiata da una superficie ideale di un corpo nero che sia alla stessa temperatura ($0 < \varepsilon < 1$) e del fattore di vista, ossia la “percentuale della superficie vista dall’oggetto”.

Lo scambio termico radiativo che ha luogo tra due superfici interne è fortemente influenzato dal fattore di vista tra la i -esima (superficie emettente) e la j -esima superficie (persona), nonché dalla emissività delle superfici stesse.

Le superfici emettenti comuni possono raggiungere emissività di 0.95, corrispondente alla radiazione ad alta lunghezza d’onda tra superfici interne. I fattori di vista stabiliscono la correlazione tra forma geometrica, dimensione (area) e distanza tra due oggetti (per esempio persona e superficie della stanza).

La somma tra i fattori di vista tra la persona e le superfici di una stanza è pari a 1.

Il fattore di vista tra una persona in piedi o seduta e le superfici può essere ricavato da diagrammi (figura 10) o calcolato (figura 11) sulla base delle equazioni (10), (11), (12).

1) Metodo grafico:

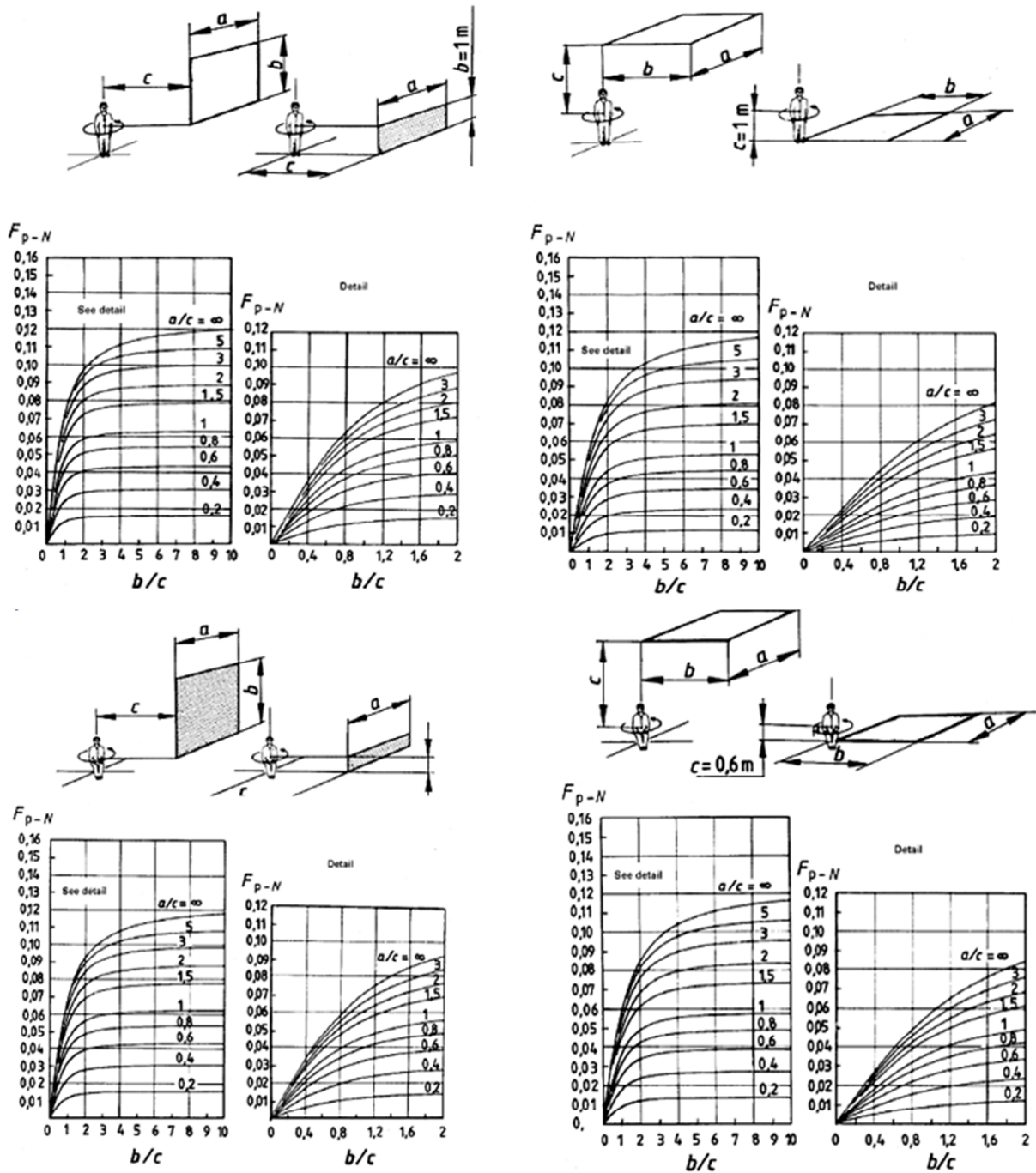


Figura 10-Diagrammi fattori di vista. Riferimento: INNOVA: Air tech instruments: "Il comfort termico".

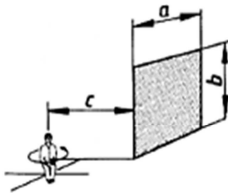
2) Metodo Analitico

$$F_{p-N} = F_{max} \left(1 - e^{-\frac{a}{c\tau}} \right) \left(1 - e^{-\frac{h}{\gamma}} \right); \quad (10)$$

Con.

$$\tau = A + B \left(\frac{a}{c} \right); \quad (11)$$

$$\gamma = C + D \left(\frac{b}{c} \right) + E \left(\frac{a}{c} \right). \quad (12)$$



$$\tau = A + B \left(\frac{a}{c} \right)$$

$$\gamma = C + D \left(\frac{b}{c} \right) + E \left(\frac{a}{c} \right)$$

	F_{max}	A	B	C	D	E
SEATED PERSON, figure B.2 Vertical surfaces: Wall, Window	0,118	1,216	0,169	0,717	0,087	0,052
SEATED PERSON, figure B.3 Horizontal surfaces: Floor, Ceiling	0,116	1,306	0,130	0,951	0,080	0,055
STANDING PERSON, figure B.4 Vertical surfaces: Wall, Window	0,120	1,242	0,167	0,616	0,082	0,051
STANDING PERSON, figure B.5 Horizontal surfaces: Floor, Ceiling	0,116	1,505	0,128	1,226	0,046	0,044

Example:

a = 4m
b = 3m
c = 5m

$$\frac{b}{c} = 0.6$$

$$\frac{a}{c} = 0.8$$

$$\tau = 1.216 + 0.169 \cdot 0.8 = 1.3152$$

$$\gamma = 0.717 + 0.087 \cdot 0.6 + 0.052 \cdot 0.8 = 0.8108$$

$$F_{p-a} = 0.028$$

Figura 11-Metodo analitico per il calcolo dei fattori di vista. Riferimento: INNOVA: Air tech instruments: "Il comfort termico".

3-Valutazione del Comfort termico della biblioteca San Giovanni dall'analisi di dati ambientali reali

3.1-Acquisizione dei dati ambientali

Come detto in precedenza, è stata individuata la biblioteca San Giovanni di Pesaro come dimostratore per l'installazione di vetri ad alte prestazioni energetiche sviluppati nell'ambito del progetto stesso, cosiddetti vetri Eensulate.



Figura 12-La biblioteca San Giovanni di Pesaro.

Il vetro sostituito è quello della portafinestra posta a sud-est, riquadrata in giallo (Figura 13). Per la valutazione delle performance del vetro e del suo effetto sul comfort ambientale della stanza in esame è stato predisposto un sistema di monitoraggio per la misura della trasmittanza termica e ottica del vetro e del comfort all'interno della stanza nelle condizioni attuali e dopo aver installato il vetro Eensulate. Si è quindi effettuata la connessione alla rete elettrica per l'alimentazione del quadro di controllo della strumentazione di misura necessaria al monitoraggio e della connessione internet per aver accesso ai dati da remoto. Il quadro di controllo è installato in prossimità della portafinestra in cui il vetro Eensulate è stato montato.

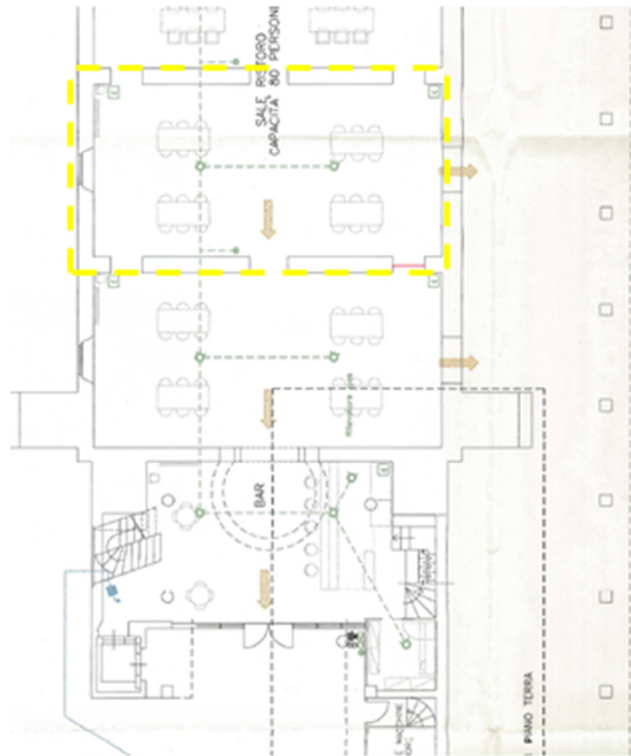


Figura 13-Zona interessata alla sostituzione della vetrata.

3.1.1-Quadro di controllo e sensori

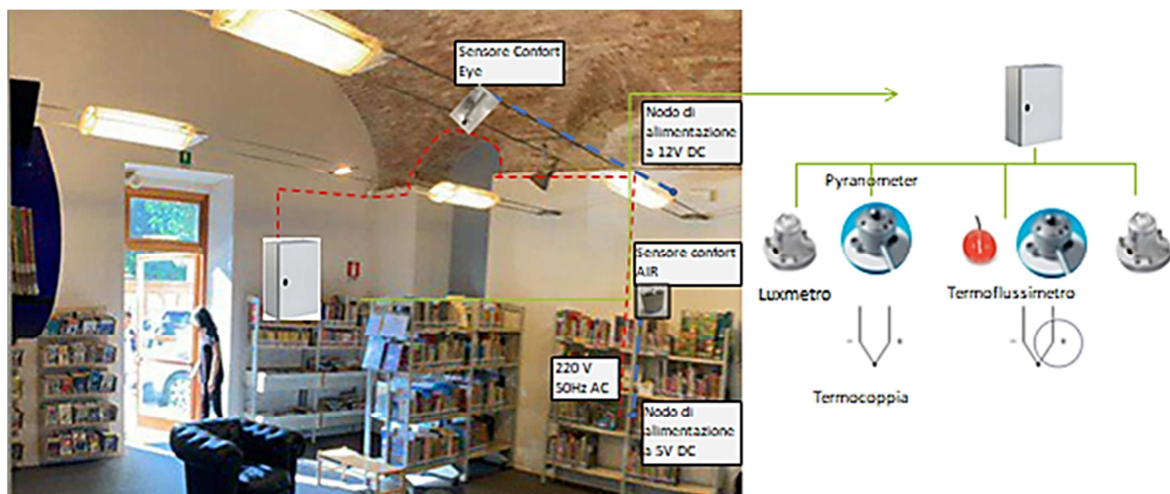


Figura 14-Schema di monitoraggio della vetrata EENSULATE.

- un piranometro e un luxmetro sono stati fissati sulla parete esterna in prossimità della porta
- tre termocoppie sul vetro esterno
- un piranometro e un luxmetro sono stati fissati sulla parete interna in prossimità della porta
- tre termocoppie sono state poste sul vetro interno.

Tutti i sensori sono controllati dal sistema di acquisizione localizzato nel quadro di controllo a cui sono connessi da cavi. Per i sensori esterni i cavi verranno fatti passare sotto la porta.

3.1.2-Sistema di monitoraggio ambientale

Il comfort ambientale verrà valutato tramite i sensori Confort Eye e Confort Air. Il Confort Eye è stato installato quanto più possibile al centro della stanza. Sono stati sfruttati i cavi di metallo che sostengono l'illuminazione, preparando un supporto simile a quello che sostiene i faretti già installati. Il Confort Air invece è stato vincolato ad uno scaffale già presente vicino alla parete nella posizione che si vede in figura. Questi due sensori comunicano con il quadro di controllo tramite rete interna wireless.

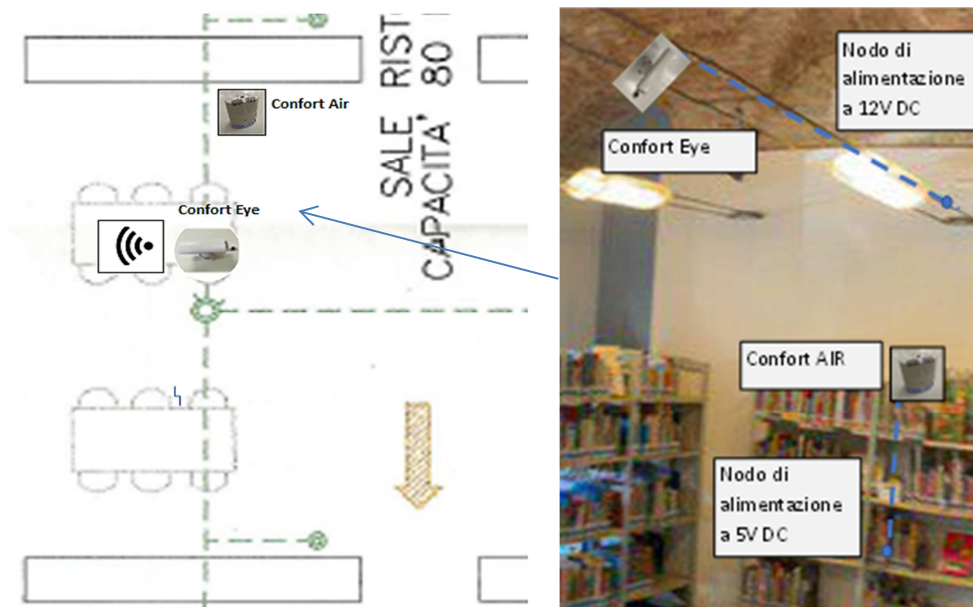


Figura 15-Sistema di monitoraggio dei parametri ambientali.

3.1.3-I sensori “Comfort air” e “Comfort eye”

Il sensore comfort air è un nodo che include in sé sensori per l’acquisizione di diversi dati ambientali, tra cui la temperatura dell’aria, l’umidità relativa, il livello di CO₂ e TVOC, e i valori di illuminazione.



Figura 16-Comfort air.

Il Comfort Eye è un sistema di rilevamento in grado di misurare le grandezze necessarie per la valutazione IEQ. Il sistema è composto da tre nodi, due dei quali con capacità di rilevamento e un gateway per la raccolta dati e la connessione con il server remoto.



Figura 17-Comfort eye.

3.1.4-IR scanning device

L'innovazione principale del Comfort Eye è uno scanner termico 3D: un sensore IR rotante a 2 assi per fornire mappe termiche delle temperature interne. Il sistema di scansione IR è installato sul soffitto della stanza per misurare le temperature della superficie interna. Le mappe termiche vengono inviate al gateway, che calcola la temperatura media radiante. Due vantaggi principali sono forniti da questa soluzione.

Il primo vantaggio è la capacità di effettuare misure multi punto della temperatura media radiante con un solo sensore. Dando la geometria della stanza, si possono scegliere più posizioni per applicare il calcolo della temperatura media radiante (es. vicino e lontano dalla finestra). Il secondo vantaggio è la possibilità di creare mappe termiche delle superfici interne che possono essere utilizzate per monitorare le prestazioni termiche dell'involucro edilizio (es. Rilevamento della temperatura superficiale della parete esterna, riconoscimento delle zone fredde, ecc.).

Il sensore IR è una matrice 16x4, il che significa che ogni frame acquisito è una mappa di 64 temperature. Il campo visivo è di 60x16 °, scansionando un'area di 1,15x0,56 m con un fotogramma su una parete a un metro di distanza dal sensore. Per fornire la scansione verticale completa di una parete è disponibile un movimento di inclinazione del sensore con un'apertura da 0 a 180 °, consentendo anche la possibilità di misurare la temperatura del pavimento e del soffitto. Il movimento pan continuo a 360 ° permette la scansione di tutte le superfici. La procedura di scansione è fissa di default, quindi vengono applicate correzioni geometriche in post-elaborazione per consentire la corretta ricostruzione delle mappe termiche. Lo scanner IR richiedeva il cablaggio per l'alimentazione a 12V. Il modulo WiFi integrato consente la comunicazione con il gateway per la trasmissione dei dati.

3.2-Procedimento per il calcolo della temperatura media radiante

I dati ambientali ottenuti dalla scansione del dispositivo di monitoraggio Comfort Eye, ci forniscono informazioni riguardo la temperatura superficiale di ogni parete, compresi soffitto e pavimento.

Esso effettua una scansione puntuale, rilevando le temperature in diversi punti per ogni superficie, quantità necessarie per il calcolo della temperatura media radiante, che andrà a concorrere alle variabili ambientali a cui fare riferimento per la valutazione del Predicted Mean Vote.

Riportando le equazioni per il fattore di vista e della temperatura media radiante all'interno di uno script MATLAB è possibile calcolare i valori della temperatura media radiante in ogni intervallo temporale nel quale le temperature superficiali sono state raccolte.

3.2.1-Calcolo dei fattori di vista per via analitica

Il calcolo dei fattori di vista è stato effettuato per via analitica, utilizzando le equazioni (10), (11) e (12) sotto riportate per ogni superficie .

$$F_{p-N} = F_{max} \left(1 - e^{-\frac{a}{\tau}} \right) \left(1 - e^{-\frac{h}{\gamma}} \right); \quad (10)$$

Con:

$$\tau = A + B \left(\frac{a}{c} \right); \quad (11)$$

$$\gamma = C + D \left(\frac{b}{c} \right) + E \left(\frac{a}{c} \right). \quad (12)$$

Dove F_{p-N} il fattore di vista tra la persona e l'n-esima superficie.

```
# Surface: FRONT

c1= L-X_H
a1 = W-Y_H
if c1 <= 0 or a1 <= 0:
    print("Decrement values of X_H and Y_H!")
    exit()
b1 = H-b
tau = A_v+B_v*(a1/c1)
gamma = C_v+D_v*(b1/c1)+E_v*(a1/c1)
F1 = F_v*(1-math.exp(-(a1/c1)/tau))*(1-math.exp(-(b1/c1)/gamma))
b1 = b
tau =A_v+B_v*(a1/c1)
gamma = C_v+D_v*(b1/c1)+E_v*(a1/c1)
F2 = F_v*(1-math.exp(-(a1/c1)/tau))*(1-math.exp(-(b1/c1)/gamma))
a1 = Y_H
b1 = H-b
tau = A_v+B_v*(a1/c1)
gamma = C_v+D_v*(b1/c1)+E_v*(a1/c1)
F3 = F_v*(1-math.exp(-(a1/c1)/tau))*(1-math.exp(-(b1/c1)/gamma))
b1 = b
tau = A_v+B_v*(a1/c1)
gamma = C_v+D_v*(b1/c1)+E_v*(a1/c1)
F4 = F_v*(1-math.exp(-(a1/c1)/tau))*(1-math.exp(-(b1/c1)/gamma))
```

Figura 18-Struttura dello script per il calcolo del fattore di vista per la superficie frontale.

Di seguito sono riportati i coefficienti geometrici necessari al calcolo ottenuti considerando le reali dimensioni della biblioteca. Tali coefficienti hanno un valore differente in base allo “stato” dell’individuo all’interno

dell'ambiente in esame, ovvero nel caso in cui esso sia seduto o in piedi.

```

T_front = T_front+273.5
T_rear = T_rear+273.5
T_left = T_left+273.5
T_right = T_right+273.5
T_ceiling = T_ceiling+273.5
T_floor = T_floor+273.5
state = 'seated'
if (state is 'seated'):
    b = 0.6
    F_v = 0.118
    A_v = 1.216
    B_v = 0.169
    C_v = 0.717
    D_v = 0.087
    E_v = 0.052
    F_o = 0.116
    A_o = 1.396
    B_o = 0.130
    C_o = 0.951
    D_o = 0.080
    E_o = 0.055
elif (state is 'standing'):
    b = 1.1
    F_v = 0.120
    A_v = 1.242
    B_v = 0.167
    C_v = 0.616
    D_v = 0.082
    E_v = 0.051
    F_o = 0.116
    A_o = 1.595
    B_o = 0.128
    C_o = 1.226
    D_o = 0.046
    E_o = 0.044

```

Temperature superficiali di rilevate

Stato del soggetto (seduto)

coefficienti in presenza di sferfici verticali

coefficienti in presenza di superfici orizzontali

Stato del soggetto (in piedi)

Figura 19-Coefficienti geometrici per la superficie frontale.

A questo punto è possibile procedere al calcolo dei sei fattori di vista (4 per le pareti circostanti, più soffitto e pavimento).

$$F_{front} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4; \quad (12)$$

$$F_{rear} = F_5 + F_6 + F_7 + F_8; \quad (13)$$

$$F_{left} = F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}; \quad (14)$$

$$F_{right} = F_{13} + F_{14} + F_{15} + F_{16}; \quad (15)$$

$$F_{cieling} = F_{17} + F_{18} + F_{19} + F_{20}; \quad (16)$$

$$F_{floor} = F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24}. \quad (17)$$

3.2.1-Calcolo della temperatura media radiante

Si richiama l'equazione della temperatura media radiante (8).

$$T_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_n^4 F_{p-n} \quad (8)$$

Dove:

T_r è la temperatura media radiante, in kelvin;
 T_n è la temperatura della n-esima superficie, in kelvin;
 F_{p-n} il fattore di vista tra la persona e l'n-esima superficie.

Ponendoci nella nostra situazione reale, essa potrà essere scritta come:

$$T_r^4(K) = T_{front}^4 F_{front} + T_{rear}^4 F_{rear} + T_{left}^4 F_{left} + T_{right}^4 F_{right} + T_{ceiling}^4 F_{ceiling} + T_{floor}^4 F_{floor} \quad (18)$$

Le temperature rilevate dal comfort eye sono state quindi moltiplicate per il corrispettivo fattore di vista che abbiamo ricavato in precedenza.

Rimuovendo l'esponente e riportando la temperatura in °C, si ottiene infine:

$$T_r(^{\circ}C) = \sqrt[4]{T_r(K)} - 273,15 \quad (19)$$

3.3-Struttura dello script MATLAB per lo studio dei dati ambientali

Vengono presi in considerazione i dati ambientali ottenuti dal monitoraggio della biblioteca San Giovanni a partire dal giorno 9 dicembre 2019 alle ore 00:30:58 fino al giorno 2 gennaio 2020 alle ore 01:54:37, ottenuti con una frequenza di 4 minuti. I dati ottenuti dal Comfort Eye necessari al calcolo del Predicted Mean Vote sono:

- Temperatura dell'aria secca (T_{air});
- Umidità relativa (RH)
- Temperatura superficiale di ogni parete compresi soffitto e pavimento, che verranno utilizzati come visto precedentemente per il calcolo della temperatura media radiante ad ogni rilevamento.

Viene considerato un valore di velocità dell'aria all'interno dell'ambiente monitorato costante pari a $v_a = 0,07$ m/s. Di seguito è riportato lo script MATLAB per lo studio dei dati ambientali.

Consumo metabolico [1 met = 58.2 W/m²]

```

MET = 1.2;
VEL = 0.07; → Velocità dell'aria [m/s]
file_template = "pmv/pmv";
CLO_min = 0.75;
CLO_max = 1.00; %per modificare
Isolam. term. Vestiario [Clo] %per modificare
numero_sample_clo = 20;

rng('shuffle')

opts = detectImportOptions(file);
opts = setvaropts(opts, 'data_rilevamento', 'InputFormat', 'dd/MM/uu HH:mm:ss');
dati = readtable(file, opts);

data_rilevamento=dati.data_rilevamento;
T=dati.T; → T aria secca [°C]
RH=dati.RH; → Umidità relativa (%)
Tmedia=dati.Tmedia; → Temperatura media radiante [°C]
PMV = dati.colonna_pmv;

```

→ Variabili personali

→ Variabili ambientali

Figura 20-Struttura dello script MATLAB per lo studio dei dati ambientali.

Lo script prevede la possibilità di modificare i due parametri personali per il calcolo, del PMV (tre se si considera la velocità dell'aria in ambienti chiusi), ossia il consumo metabolico M [met] e l'isolamento termico del vestiario I_{cl} [clo].

3.4-Scelta del valore di consumo metabolico

Il metabolismo M esprime l'energia prodotta dall'organismo umano nell'unità di tempo, ed è convertita parzialmente in lavoro meccanico L scambiato con l'esterno e in calore corporeo Q : $M=L+Q$ [met] (metabolismo in condizioni di riposo = 1 met = 58 W/m²di superficie corporea). Nella maggior parte dei casi in ambito residenziale e terziario L è quasi sempre nullo o trascurabile, pertanto possiamo assumere con buona approssimazione che $M=Q$.

I valori utilizzabili sono riportati in tabelle dove per ogni attività fisica descritta è riportata in valori di W/m² e in met.

Nel nostro studio prenderemo in considerazione i valori di M compresi tra 1.0 met, che corrisponde al consumo metabolico speso nello stare seduti in

inattività e 1.6 met, cioè un'attività di lavoro che prevede spostamenti limitati ed in cui è raramente necessario svolgere azioni in piedi.

Stare seduti e rilassati	58 W/m ²	1,0 (met)
Riparare orologi	65 W/m ²	1,1 (met)
Stare in piedi rilassati	70 W/m ²	1,2 (met)
Attività sedentaria (ufficio, scuola, laboratorio)	70 W/m ²	1,2 (met)
Guidare un'auto	80 W/m ²	1,4 (met)
Grafico – Rilegatore	85 W/m ²	1,5 (met)
Stare in piedi, esercitando un'attività leggera (shopping, laboratorio, industria leggera)	93 W/m ²	1,6 (met)

Figura 21-Range di consumo metabolico di nostro interesse. Riferimento: INNOVA: Air tech instruments: “Il comfort termico”.

Considerato il tipo di attività che verrà svolta all'interno della Biblioteca San Giovanni e facendo riferimento a studi operati in situazioni di indagine simile, si è deciso per un valore di consumo metabolico pari a 1,2 met (70 W/m²) ovvero corrispondente ad un'attività d'ufficio o scolastica sedentaria.

3.5-Generazione dei valori di isolamento termico del vestiario

Calcolati i valori della temperatura media radiante, considerando una velocità dell'aria all'interno dell'ambiente termico pari 0,07 m/s e deciso per un tasso metabolico di 1,2 met, occorre definire il valore di Icl.

Si vuole capire quale tipo di vestiario i soggetti all'interno dell'ambiente termico debbono indossare combinato al tipo di attività fisica svolta, per fare in modo che il benessere termico sia accettato da tutta la popolazione sottoposta allo studio.

Ciò si traduce della necessità di trovare un valore di Icl (i cui valori si attestano tra lo 0,4 e 1 clo) corrispondente ad un determinato tipo di vestiario (da leggero a pesante fino a molto pesante). Tali valori sono schedulati in tabelle presenti all'interno della norma UNI EN ISO 7730.

Per trovare tale valore il programma prevede la possibilità di generare 20 file .txt che saranno utilizzati per calcolare il valore delle curve di PMV, con la possibilità di inserire dei valori di range compresi tra due selezionati inizialmente CLO_min e CLO_max.

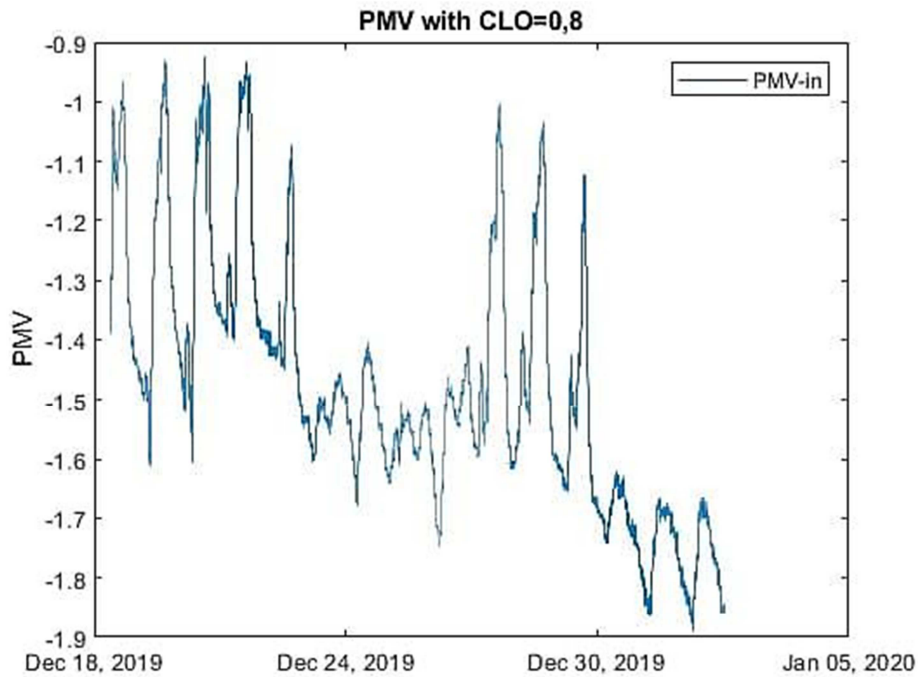


Figura 22-Curva PMV-tempo ottenuta per un valore di $I_{cl}=0,8$ clo.

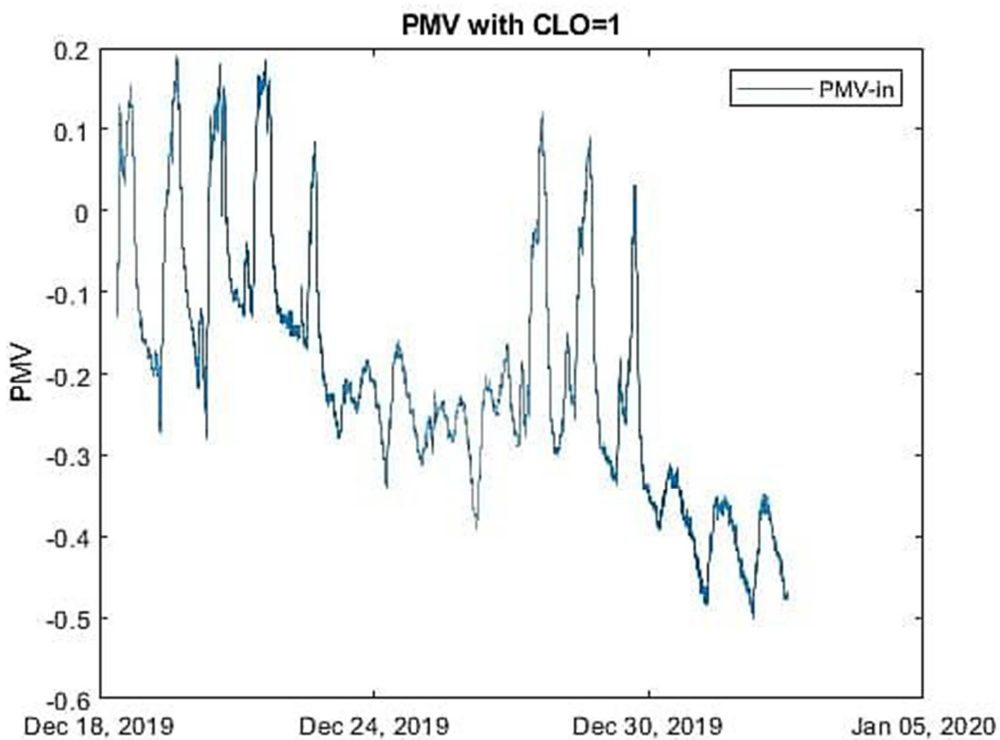


Figura 23-Curva PMV-tempo ottenuta per un valore di $I_{cl}=1$ clo.

Saranno presenti in questo modo 20 diverse curve di PMV graficate rispetto al tempo. Sovrapponendo tra loro le curve è possibile, decidendo il range di accettabilità di comfort che si vuole ottenere, estrapolare la curva in cui tutti i punti si trovano all'interno del range e quindi decidere il valore

ottimale di Icl del vestiario della popolazione all'interno dell'ambiente termico. La curva da prendere in considerazione sarà quelle comprese tra i due valori di PMV scelti, ovvero all'interno dell'intervallo $-0,5 < PMV < +0,5$. In figura 24 sono riportate in diverse colorazioni le differenti curve di PMV nel tempo, ottenute a partire da diversi livelli di isolamento termico del vestiario. Come si può osservare la curva che soddisfa tale condizione in ogni rilevazione è quella ottenuta ponendo un valore di Icl nell'intorno di $0,95 \pm 0,05$ [clo].

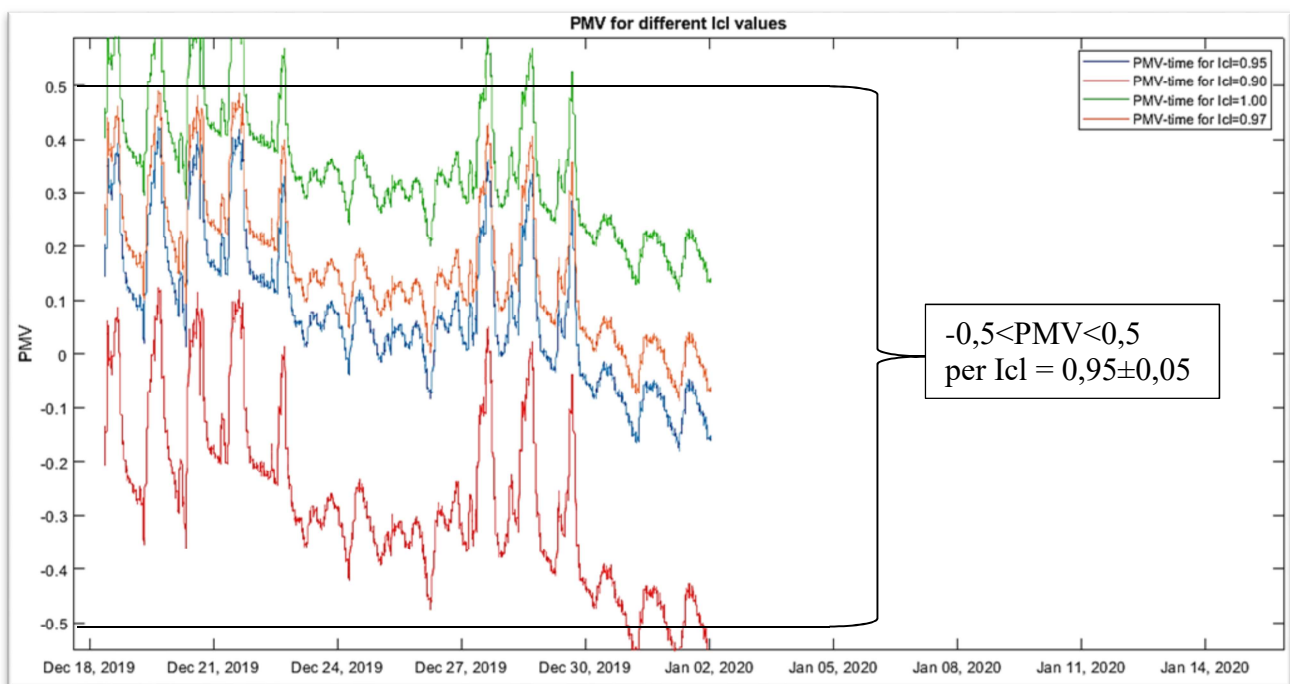


Figura 24-Range di accettabilità del PMV.

```

%CLO = 0.2;
MET = 1.2;
VEL = 0.07;

file_template = "pmv/pmv";

CLO_min = 0.95;
CLO_max = 0.95;           %per modificare

numero_sample_clo = 20;  %per modificare

rng('shuffle')
    
```

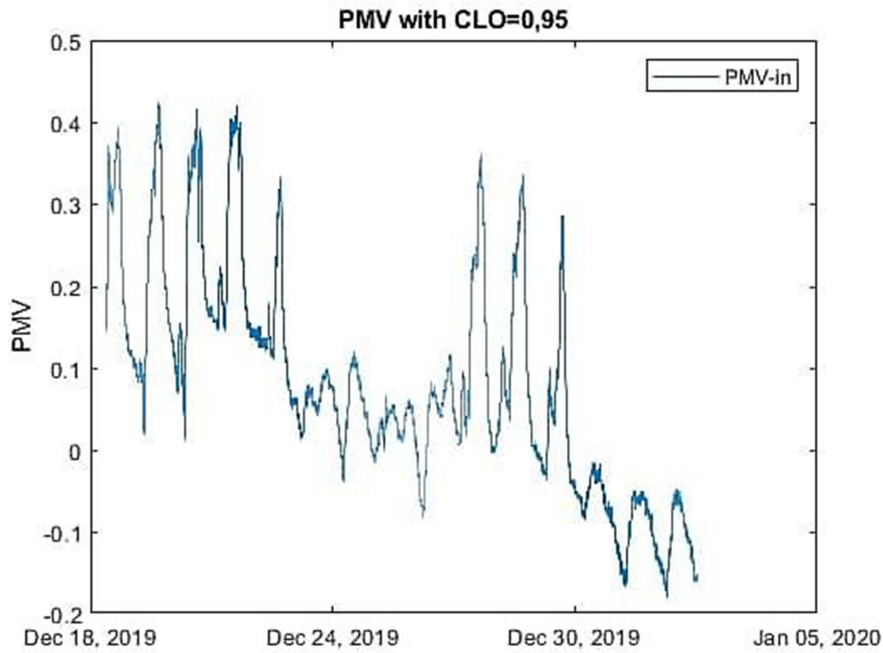


Figura 25-Curva che soddisfa i parametri di comfort ($I_{cl}=0,95clo$).

Lo script consente anche di valutare l'andamento medio del PMV specificando il range orario attraverso il quale effettuare il calcolo, ciò è utile al fine di un confronto diretto con l'analisi soggettiva che vedremo in seguito, in quanto i questionari verranno sottoposti nell'arco di una singola giornata.

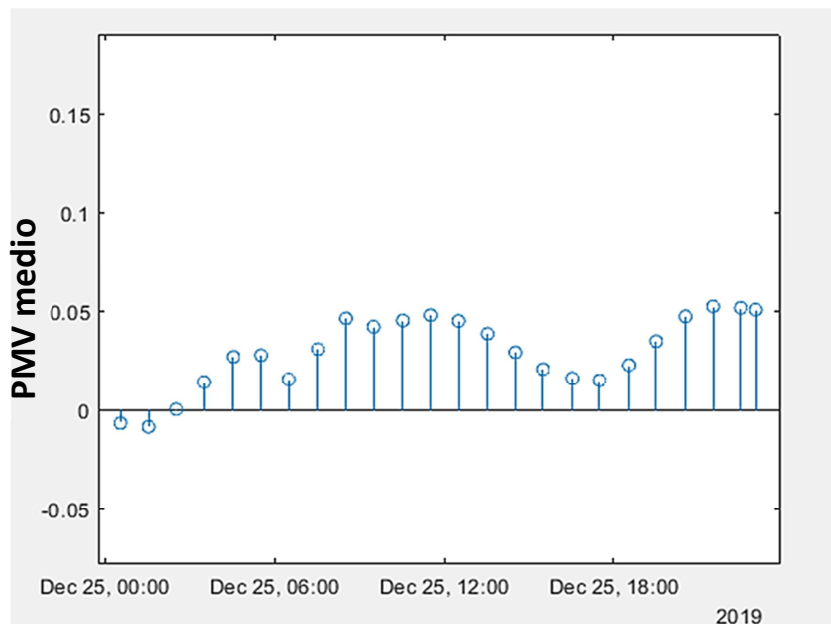


Figura 26-Regressione oraria(PMV medio-tempo)

3.6-Conclusioni dello studio dei dati ambientali oggettivi

A questo punto occorre effettuare il confronto con le caratteristiche della normativa perché siano verificate le condizioni di comfort termico in ambiente lavorativo per attività sedentarie. La UNI EN ISO 7730 fornisce per tali condizioni questi requisiti:

1. $-0.5 < PMV < +0.5$;
2. $DR < 15\%$ al collo e alla caviglia;
3. Le differenze verticali della temperatura dell'aria livello caviglia-livello testa $< 3^{\circ}C$;
4. L'asimmetria della temperatura radiante da finestre fredde $< 10^{\circ}C$;
5. L'asimmetria della temperatura radiante dal soffitto caldo $< 5^{\circ}C$;
6. La temperatura superficiale del pavimento deve essere compresa tra $19^{\circ}C-29^{\circ}C$;
7. L'umidità relativa deve essere compresa tra il 30% ed il 70%.

Per le condizioni termo-igrometriche ricavate dai dati ambientali, possiamo affermare di rientrare grazie alla nostra valutazione all'interno dei parametri di comfort.

Si conclude che, dall'analisi dei dati ambientali, svolgendo un'attività d'ufficio sedentaria ($M=1,2$ met) all'interno della biblioteca, per garantire un valore che sia contenuto nel range di accettabilità il valore di isolamento termico del vestiario deve valere $I_{cl}=0,95$ clo, ossia un tipo di vestiario pesante da interno, in linea con il periodo stagionale nel quale lo studio è stato svolto.

4-La valutazione soggettiva del comfort termico: struttura del questionario e indici statistici

4.1-La normativa UNI EN ISO 10551

La norma [N4] presenta principi ed esempi di applicazione pratica per la costruzione di appropriate scale di giudizio da utilizzare nella valutazione degli ambienti fisici. Questa norma non propone scale specifiche, ma considera scale di percezione, benessere, preferenza, accettabilità, forme di espressione e tolleranza e aspetti ambientali quali quello termico, visivo, della qualità dell'aria, acustico e della vibrazione. Non prende in considerazione altre scale quali:

- scale relative agli effetti dell'ambiente sulla capacità di leggere display o segni, sulle prestazioni manuali o su condizioni psicologiche come l'umore, ecc.;
- scale relative al dolore o scale relative a stimoli che possono portare a lesioni.

La norma non presenta i principi delle indagini o la progettazione del questionario. Tuttavia, le scale che vengono sviluppate utilizzando la norma possono essere incluse in sondaggi o questionari.

4.2- Costruzione delle scale di giudizio per un ambiente termico e condizioni di utilizzo

Gli standard internazionali raccomandano delle scale di giudizio soggettivo basate sullo stato termico del corpo, in caso di condizioni climatiche stabili, con una popolazione impegnata in un lavoro sedentario ($60 \text{ W/m}^2 < \text{met} < 70 \text{ W/m}^2$) vestiti in maniera normale ($0,5 \pm 0,2 \text{ clo} < \text{Icl} < 1,0 \pm 0,2 \text{ clo}$), e dopo una permanenza di 30 minuti, il giudizio globale dato dalla popolazione riguardo il suo stato termico e il giudizio globale dato riguardo la temperatura ambientale sono tipicamente in accordo. Nei termini di uno studio effettuato in ambito lavorativo questo tipo di studio risulta particolarmente rilevante. Questo tipo di giudizi espressi dalla popolazione

riguardo il loro stato termico sono infatti più rilevanti per un ergonomista che giudizi effettuati sull'ambiente termico.

4.3-Costruzione di scale di giudizio percettivo, valutativo e preferenziale

Le tre scale di giudizio devono essere costruite e proposte, secondo la UNI EN ISO 10551 nel seguente ordine: scala percettiva, scala valutativa e scala di preferenza.

-Prima sottoporre domande sulla scala percettiva. "Cosa senti (in questo preciso momento)?"

Seguono le risposte in base alle scale.

-Dopo il giudizio espresso riguardo alla scala percettiva e subito prima di esprimere un giudizio valutativo. "Come trovi l'ambiente termico?"

Segue risposta in base alle scale.

-Dopo il giudizio espresso sulla scala valutativa e subito prima che venga sottoposta la domanda sulla preferenza personale. "Per favore esprimi come vorresti sentirti ora".

4.3.1-Struttura della scala di giudizio personale dello stato termico (percezione)

Si utilizza una scala graduata con 7 possibili risposte e due poli A e B, che può essere estesa a 9:

Polo A (-4) -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 (+4) Polo B
(neutralità)

I poli A e B sono entrambi i limiti della scala da A = FREDDO e B = CALDO. Il punto centrale "0" corrisponde alla neutralità termica, ovvero ASSENZA DI FREDDO E CALDO.

4.3.2-Struttura della scala di giudizio valutativa

Una scala con 4 gradazioni ed un solo polo, che possono essere estesi a 5, con il punto di origine indicante l'assenza dell'effetto e 3 (o 4) gradi di incremento ad indicare l'intensità dell'effetto.

Origine 0 1 2 3 (4) Polo unico
gradi di intensità

Il Polo unico sta ad indicare l'intensità dell'effetto in negativo, come ad esempio DISCOMFORT, INSODDISFAZIONE. Il COMFORT è applicato al punto di origine della scala.

4.3.3-Struttura della scala di giudizio di preferenza termica

Una scala simmetrica bipolare di 7 gradi, comprendente un punto centrale di indecisione e tre gradi di incremento in positivo e tre in negativo.

Polo A -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 Polo B
(indecisione)

I poli A e B sono entrambi gli estremi della scala dove A = PIU' FREDDO e B = PIU' CALDO. Il punto centrale corrispondente allo "0" esprime la volontà di non effettuare NESSUN CAMBIAMENTO.

4.4-Scale di accettabilità e tolleranza personale

In aggiunta alle precedenti scale di giudizio, dati rilevanti possono essere estrapolati attraverso un'indagine personale su come i lavoratori si sentono personalmente riguardo il loro stato termico.

Questa valutazione viene effettuata in termini di rigetto o accettazione a livello personale, e a differenza delle precedenti scale di giudizio è relativa all'ambiente termico circostante (clima locale).

Le scale di accettabilità e di tolleranza personale sono applicate dopo quella valutativa e di percezione viste in precedenza, e ponendo prima il quesito sull'accettabilità, e successivamente sulla tolleranza personale.

4.4.1-Acceptabilità personale

L'accettabilità personale viene inizialmente valutata attraverso una scala binaria strutturata come segue:

- Accettabilità personale (Generalmente accettabile);
- Rifiuto personale (Generalmente inaccettabile);

Questi risultanti sono ottenuti ponendo un quesito diretto del tipo: "Come giudichi il clima locale a livello personale?"

La cui risposta può essere di accettazione o di rifiuto.

Stato iniziale	Categoria: Accettabile	Categoria: Inaccettabile
Accettabilità personale	Sì (approva)	No (disapprova)
Rifiuto personale	No (disapprova)	Sì (approva)

Figura 27-Tabella accettabilità/inaccettabilità.

4.4.2-Tolleranza personale

La scala di tolleranza personale è composta di 5 gradi e di un solo polo che esprime DIFFICOLTA' DI SOPPORTAZIONE dell'ambiente, con un punto di origine che rappresenta nessuna difficoltà e 4 gradi di giudizio intermedi.

Origine 0 1 2 3 4 Polo unico
 gradi di intensità

4.5-Riassunto della struttura del questionario

La seguente tabella riassume la struttura dei quesiti posti e le scale di giudizio adoperate per essere sottoposte alla popolazione.

Tipo di giudizio	Percezione	Valutazione termica	Preferenza termica	Accettabilità personale	Tolleranza personale
	Stato termico personale			Ambiente termico	
Traduzione in quesito	<p>1) <i>Cosa senti nei confronti di questo ambiente?</i></p> <p>-Da POLO A:+4 (molto caldo) a POLO B:-4 (molto freddo), 0 (neutralità termica).</p>	<p>2) <i>Come lo trovi?</i></p> <p>-Da POLO 0 (confortevole) a +4 (estremamente non confortevole).</p>	<p>3) <i>In questo momento preferiresti un'ambiente...</i></p> <p>-Da POLO A: +3(molto più caldo) a POLO B:-3(molto più freddo), 0 (senza modifiche).</p>	<p>4) <i>stando alla tua preferenza personale, ritieni accettabile questo ambiente climatico?</i></p> <p>-SI/NO .</p>	<p>5) <i>giudichi questo ambiente...</i></p> <p>-Da POLO 0(perfettamente tollerabile) a +4(intollerabile).</p>

Figura 28-Struttura dei quesiti presenti nel questionario.

Il questionario risulterà avere una struttura del tipo:

Valutazione soggettiva del comfort termico

1. Cosa senti nei confronti di questo ambiente?

Contrassegna solo un ovale.

- Molto caldo
- Caldo
- Leggermente caldo
- Nè caldo nè freddo
- Leggermente freddo
- Freddo
- Molto freddo

2. Come lo trovi?

Contrassegna solo un ovale.

- Confortevole
- Per lo più confortevole
- Appena confortevole
- Non confortevole
- Estremamente non confortevole

3. In questo momento preferiresti un'ambiente...

Contrassegna solo un ovale.

- Molto più freddo
- Più freddo
- Leggermente più freddo
- Senza alcun cambiamento
- Leggermente più caldo
- Più caldo
- Molto più caldo

4. Stando alla tua preferenza personale, ritieni accettabile questo ambiente?

Contrassegna solo un ovale.

- Sì
- No

5. Giudichi questo ambiente...

Contrassegna solo un ovale.

- Perfettamente tollerabile
- Appena difficile da tollerare
- Difficile da tollerare
- Molto difficile da tollerare
- Intollerabile

Figura 29-Facsimile del questionario.

4.6-Analisi dati e applicazione dei risultati

Le proprietà numeriche dei dati raccolti applicando le scale di giudizio viste in precedenza e la distribuzione statistica indicano il tipo di analisi quantitativa che può essere loro legittimamente applicata.

I gradi delle scale di percezione, valutazione sensoriale, preferenza e tolleranza sono classificate in gruppi di dati osservabili in un insieme matematico finito e ordinato.

Le statistiche rilevanti sono le seguenti:

- 1) Percezione termica: Media, deviazione standard, t-test* della differenza tra la media osservata e una media nulla;
- 2) Valutazione soggettiva: Mediana, % discomfort;
- 3) Preferenza termica: Mediana, chi-squared test**;
- 4) Valutazione accettabilità: Moda, % inaccettabilità;
- 5) Tolleranza personale: Mediana.

Il t-test è uno strumento che consente di determinare se due numeri, in questo caso i valori della media osservata e la media nulla, sono significativamente diversi l'uno dall'altro. Questo test viene utilizzato quando si sottopone più volte lo stesso gruppo di persone alla stessa indagine. Effettuare un t-test accoppiato consente di sapere se la media è cambiata tra la prima e la seconda indagine.

Il test di chi-quadro (χ^2) è una tecnica di inferenza statistica che si basa sulla statistica di chi quadro e sulla relativa distribuzione di probabilità. Si può usare con variabili a livello di scala nominale o ordinale, generalmente disposte in forma di tabelle di contingenza. Lo scopo principale di questa statistica è di verificare le differenze tra valori osservati e valori teorici (generalmente chiamati "attesi") e di effettuare un'inferenza sul grado di scostamento fra i due

Il t-test e il Chi-squared test sono calcolati in MATLAB come segue:

*t-test: restituisce una decisione di test per l'ipotesi nulla che i dati in x provengano da una distribuzione normale con media uguale a zero e varianza sconosciuta, utilizzando il test t di un campione. L'ipotesi alternativa è che la distribuzione della popolazione non abbia una media uguale a zero. Il risultato h è 1 se il test rifiuta l'ipotesi nulla al livello di significatività del 5% e 0 altrimenti. Restituisce anche il valore p del test,

utilizzando uno qualsiasi degli argomenti di input dai gruppi di sintassi precedenti.

**Chi-squared test: restituisce una decisione di test per l'ipotesi nulla che i dati nel vettore x provengano da una distribuzione normale con media e varianza stimata da x , utilizzando il test di bontà del chi quadrato. L'ipotesi alternativa è che i dati non provengano da tale distribuzione. Il risultato h è 1 se il test rifiuta l'ipotesi nulla al livello di significatività del 5% e 0 altrimenti.

5-Valutazione del Comfort termico della biblioteca San Giovanni dall'analisi statistica di risposte a questionari

La seconda parte dello studio prevede l'analisi dei dati raccolti dalle risposte a questionari sul comfort termico sottoposti ad una popolazione all'interno della biblioteca. Il periodo preso a riferimento è lo stesso dello studio dei dati ambientali oggettivi del capitolo 3, e quindi alle stesse condizioni ambientali. Non essendo disponibili risposte reali, esse sono state generate attraverso degli script MATLAB, facendo riferimento alle conclusioni ottenute dalla norma UNI EN ISO 10551 in «Example B: repeated comfort assessment in a laboratory setting», ossia a partire dai valori della media e della deviazione standard.

5.1-Struttura dell'indagine

Come la norma UNI EN ISO 10551 prevede, per effettuare un'indagine in un luogo di lavoro attraverso la somministrazione ripetuta di un questionario, occorre preliminarmente definire alcuni parametri tra cui:

- Tipo di popolazione presa in esame (numero, sesso, età);
- Range orario all'interno del quale i questionari sono sottoposti;
- Tipo di vestiario (valore di resistenza termica del vestiario, I_{cl});
- Tipo di attività fisica svolta (consumo metabolico, M).

Per gli ultimi due punti, grazie allo studio effettuato sull'analisi dei dati ambientali riportata nel capitolo 3, possiamo definire dei valori di resistenza termica del vestiario e consumo metabolico ottenuti in modo empirico che sappiamo essere adatti e sufficienti a garantire il comfort termico ai soggetti in esame.

Tali valori sono:

- Resistenza termica del vestiario: $I_{cl} = 0,95 \text{ clo}$;
- Consumo metabolico: $M = 1,2 \text{ met}$.

La simulazione dell'indagine può quindi avvenire a partire dalle suddette condizioni, seguendo le istruzioni riportate dalla norma in «Example B: repeated comfort assessment in a laboratory setting»:

Si intende sottoporre un questionario ripetuto nell'arco di una mattinata ad una popolazione di 12 adulti in salute di età compresa tra i 18 e i 30 anni, 6 uomini e 6 donne, vestiti in modo pesante ($I_{cl}=0,95$ clo) e sottoposti ad un'attività d'ufficio all'interno della biblioteca San Giovanni con un consumo metabolico di bassa intensità ($M=1,2$ met). Esso viene distribuito ad intervalli orari dalle ore 08:55 alle ore 12:00 con la seguente cadenza: 08:55; 09:40-55; 10:40-55; 11:40-55.

5.2-Generazione delle risposte ai questionari

Come riportato nel paragrafo 4.5, la struttura del questionario si compone di 5 domande, a ciascuna delle quali gli interrogati potranno rispondere attraverso le scale di giudizio strutturate in precedenza.

Riassumendo, i quesiti presenti nel questionario sono:

- 1) Percezione Termica (*Cosa senti nei confronti di questo ambiente?*)
-Da POLO A:+4 (*molto caldo*) a POLO B:-4 (*molto freddo*), 0 (*neutralità termica*).
- 2) Valutazione Soggettiva (*Come lo trovi?*)
-Da POLO 0 (*confortevole*) a 4 (*estremamente disagiata*)
- 3) Preferenza Termica (*in questo momento preferiresti un'ambiente...*)
-Da POLO A: +3(*molto più caldo*) a POLO B:-3(*molto più freddo*), 0 (*senza modifiche*).
- 4) Valutazione dell'accettabilità (*stando alla tua preferenza personale, ritieni accettabile questo ambiente climatico?*)
-SI/NO .
- 5) Tolleranza personale (*giudichi questo ambiente...*)
-Da POLO 0(*perfettamente tollerabile*) a +4(*intollerabile*).

A ciascuno dei quesiti sopra riportati vengono generate attraverso degli script MATLAB delle risposte a partire dai valori di media e deviazione standard riportati all'interno della normativa, simulando una situazione di generico comfort della popolazione all'interno dell'ambiente termico. All'interno degli stessi script vengono applicati gli operatori statistici come riportato nel paragrafo 4.6, necessari per l'analisi delle risposte. Di seguito sono riportate le risposte ai questionari suddivise per fascia oraria di somministrazione.

Tutti i risultati numerici dell'indagine statistica sono riportati nel paragrafo 5.3.

5.2.1-Generazione delle risposte ai questionari: Percezione Termica

Cosa senti nei confronti di questo ambiente?

-Da POLO A:+4 (*molto caldo*) a POLO B:-4 (*molto freddo*), 0 (*neutralità termica*). Per il primo quesito, a partire dai valori di media e deviazione standard riportati, si ottiene la seguente distribuzione (Figure 30,31,32,33):

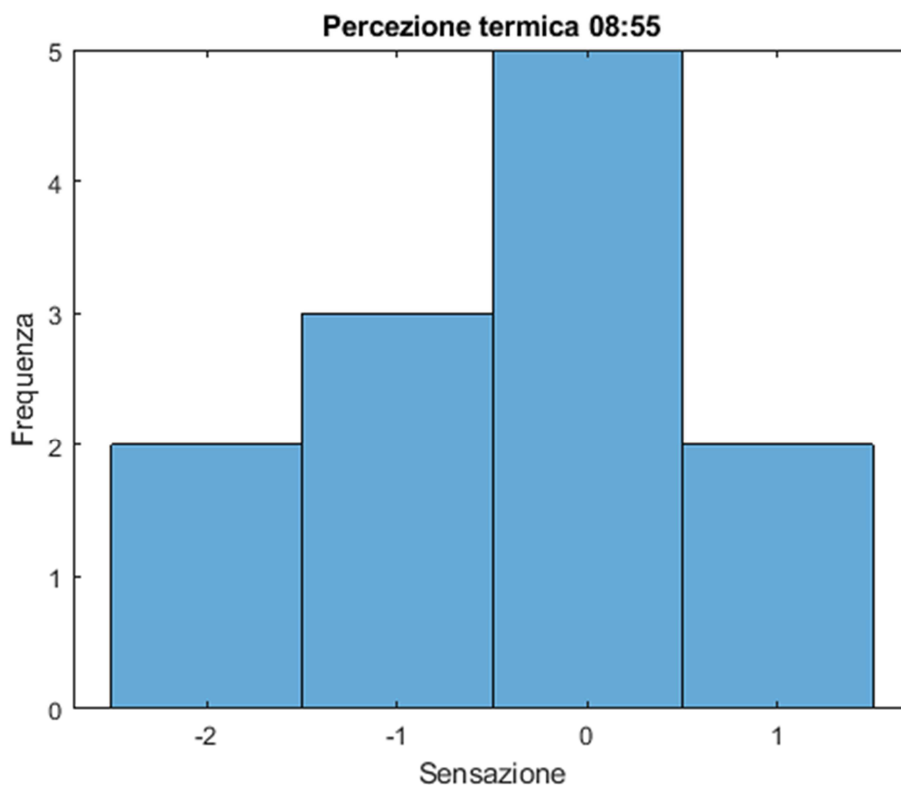


Figura 30-Distribuzione delle risposte, percezione termica 08:55.

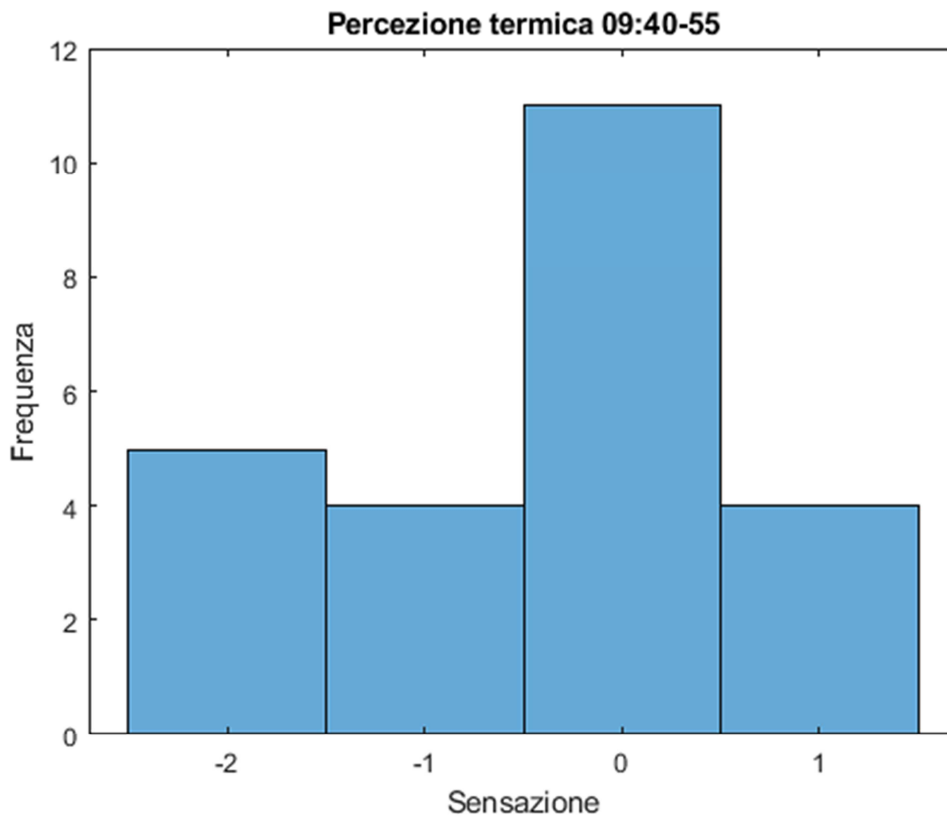


Figura 31- Distribuzione delle risposte, percezione termica 09:40-55.

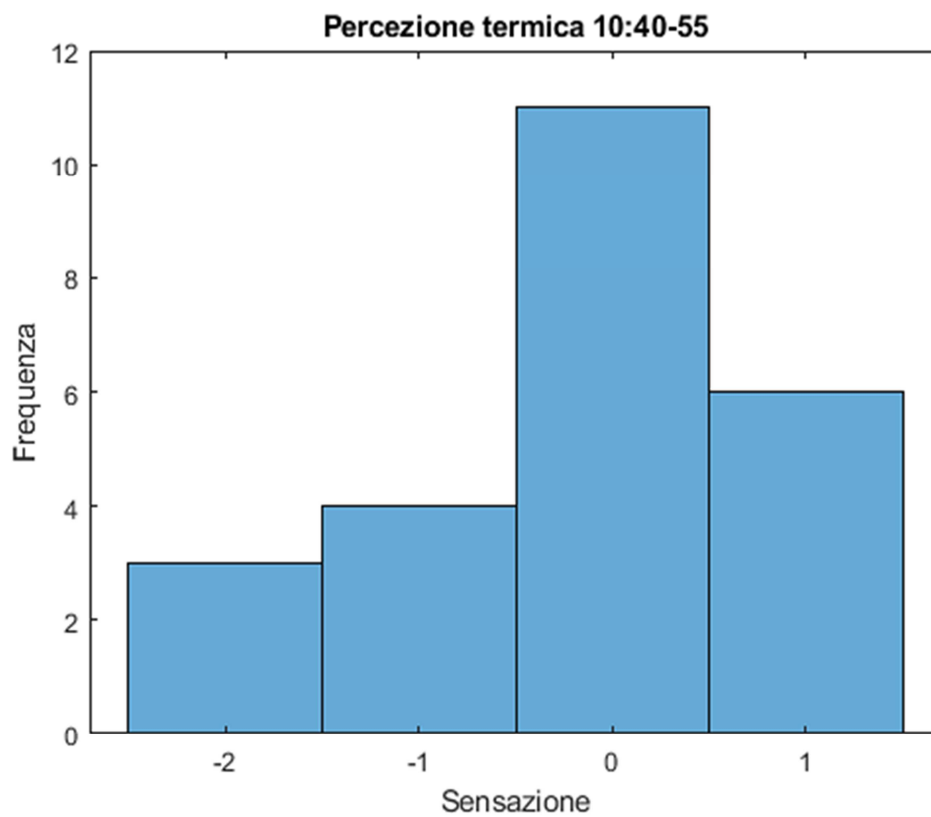


Figura 32- Distribuzione delle risposte, percezione termica 10:40-55.

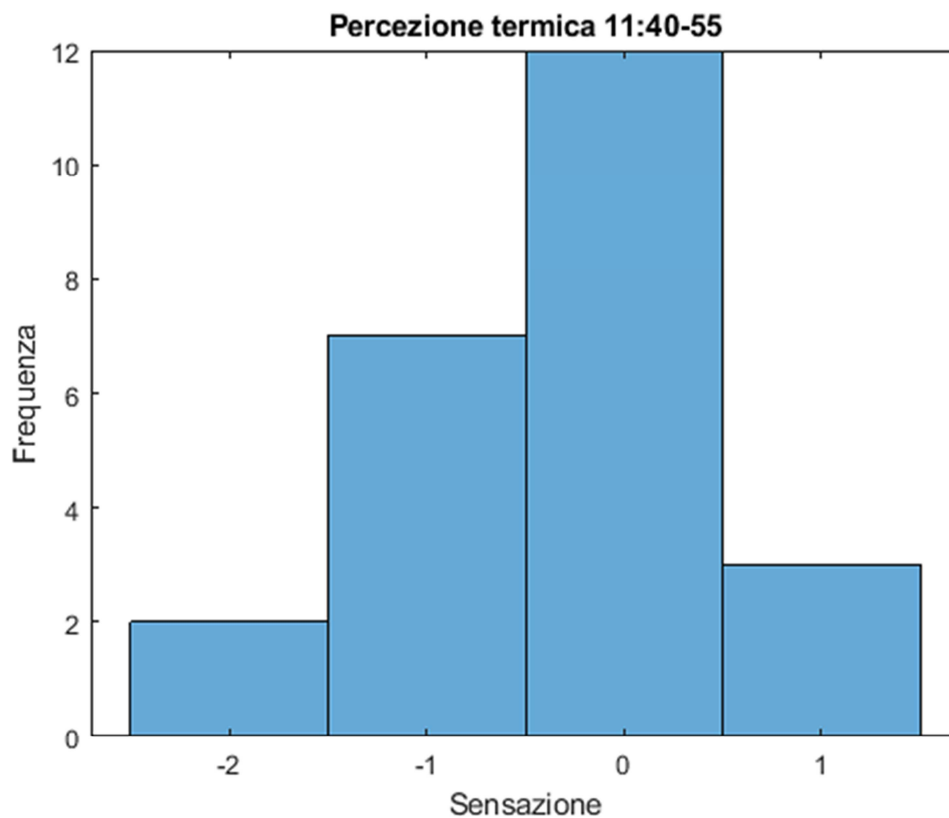


Figura 33- Distribuzione delle risposte, percezione termica 11:40-55.

Di questa vengono quindi calcolate media, deviazione standard, t-test della differenza tra la media osservata e media nulla.

5.2.2-Generazione delle risposte ai questionari: Valutazione Soggettiva

Come lo trovi?

-Da POLO 0 (*confortevole*) a 4 (*estremamente disagiata*). Per il secondo quesito si ottiene la seguente distribuzione (Figure 34,35,36,37):

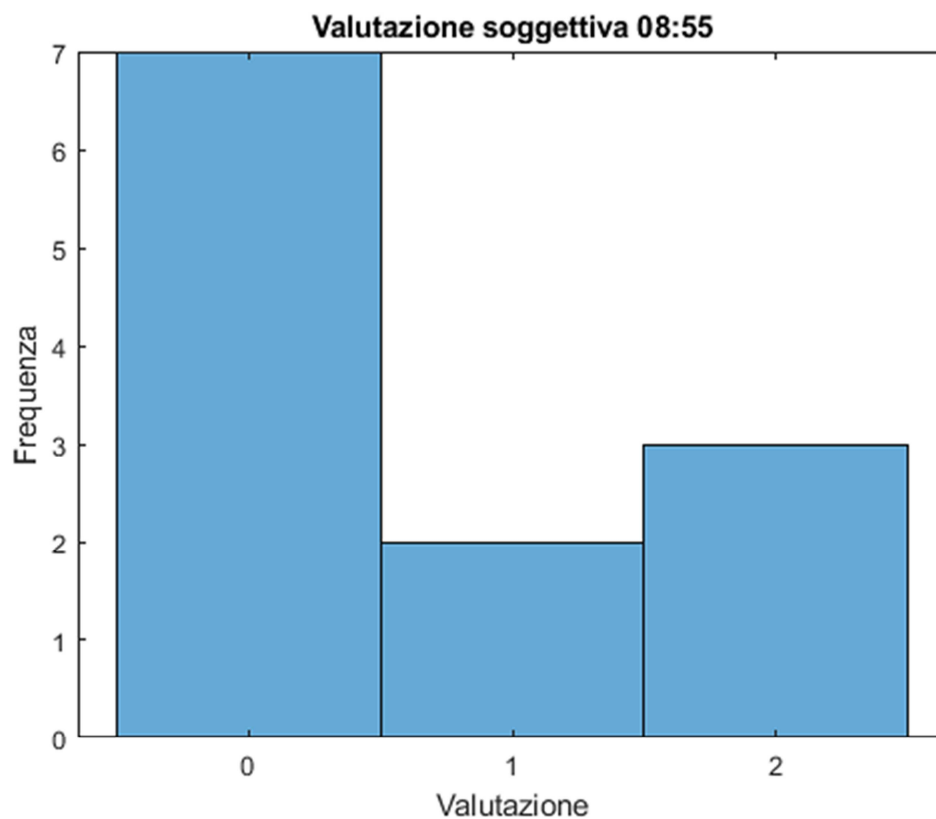


Figura 34- Distribuzione delle risposte, valutazione soggettiva 08:55.

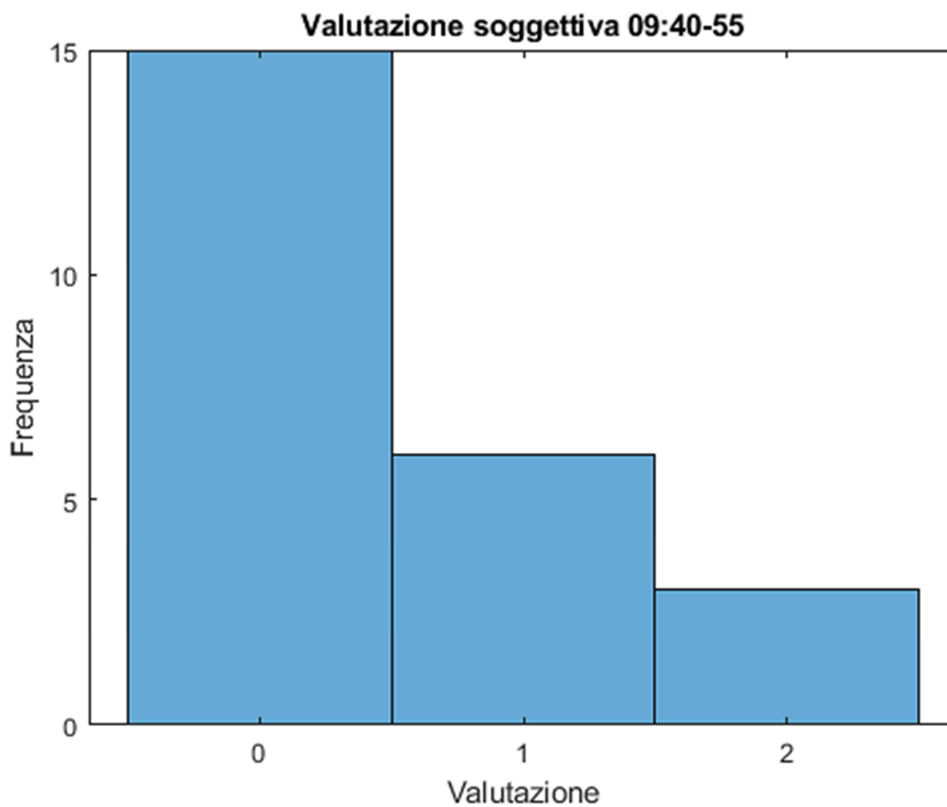


Figura35- Distribuzione delle risposte, valutazione soggettiva 09:45-55.

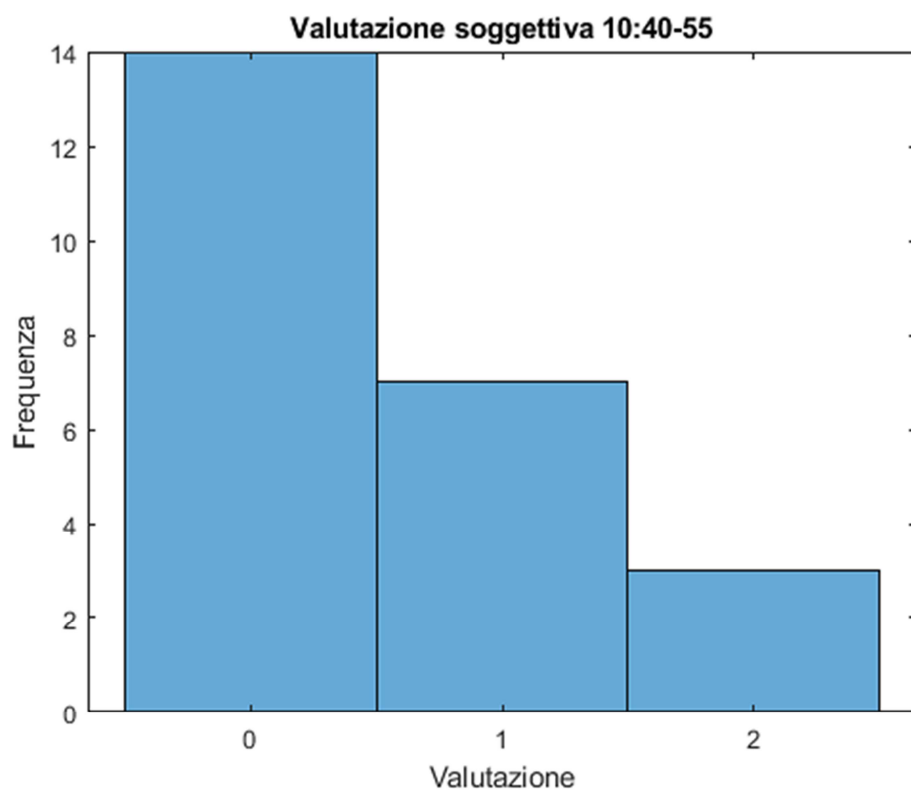


Figura 36- Distribuzione delle risposte, valutazione soggettiva 10:45-55.

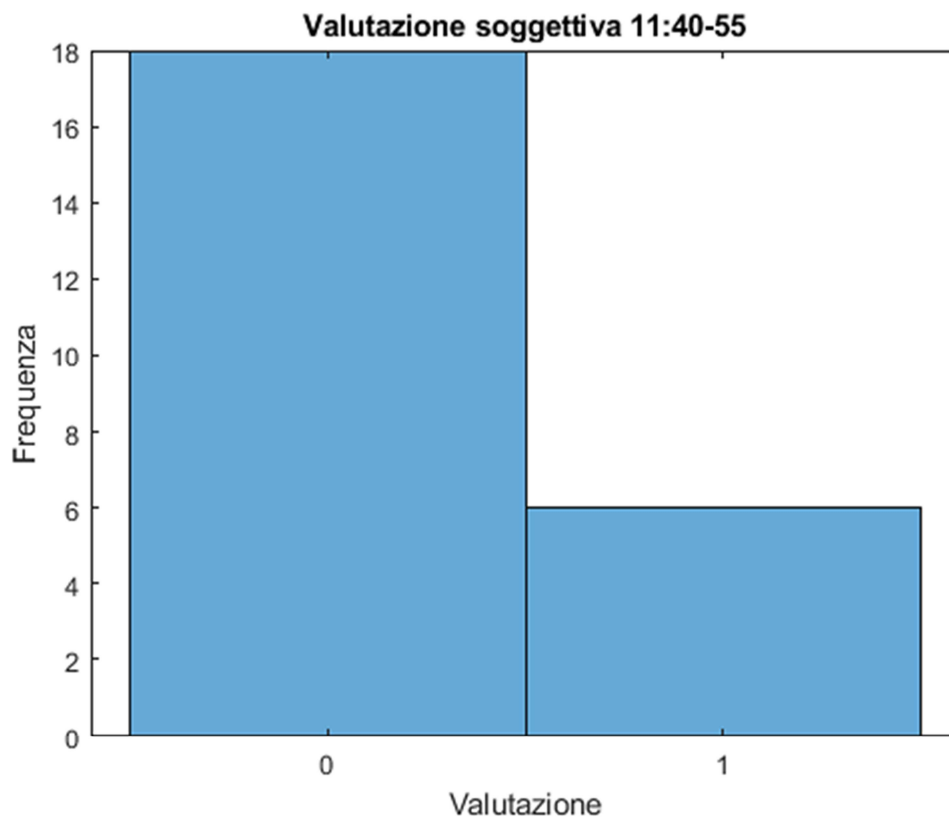


Figura 37- Distribuzione delle risposte, valutazione soggettiva 11:40-55.
Di questa vengono quindi calcolate mediana e la % di discomfort.

5.2.3-Generazione delle risposte ai questionari: Preferenza Termica

In questo momento preferiresti un' ambiente...

-Da POLO A: +3(molto più caldo) a POLO B:-3(molto più freddo), 0 (senza modifiche). Per il terzo quesito si ottiene la seguente distribuzione (Figure 38,39,40,41):

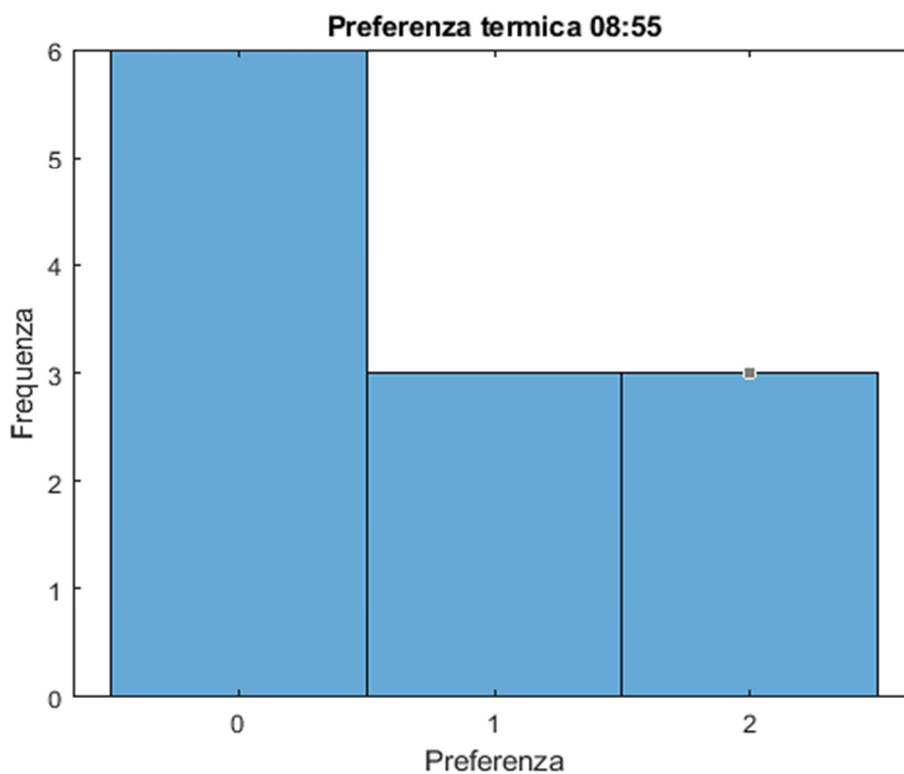


Figura 38- Distribuzione delle risposte, preferenza termica 08:55.

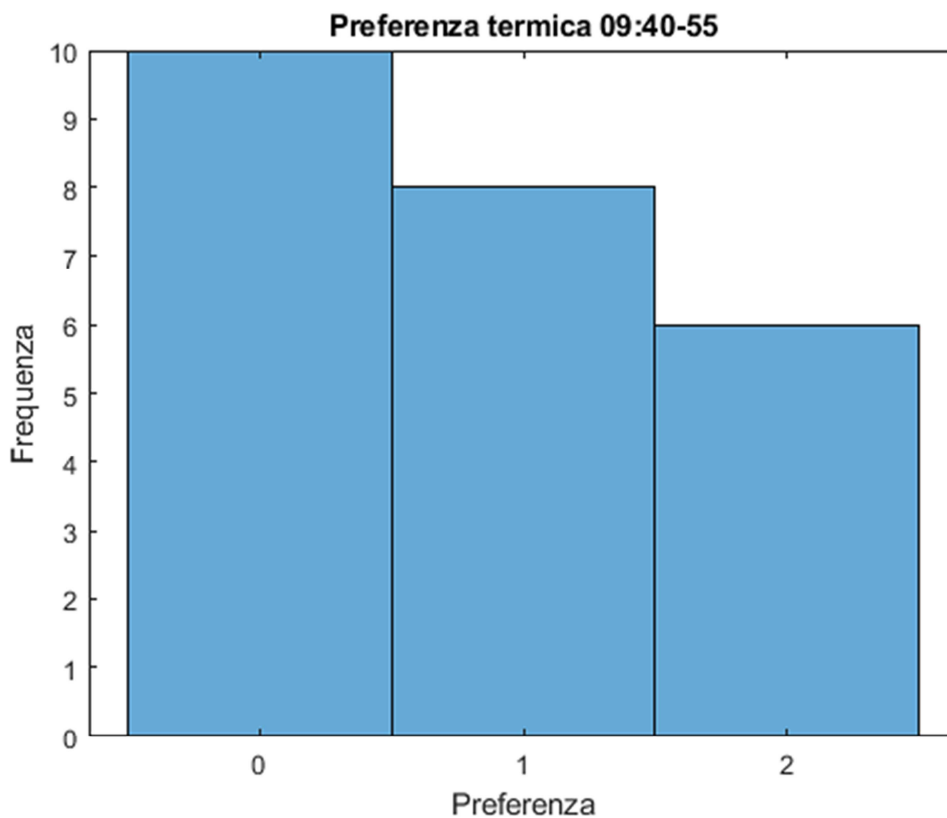


Figura 39- Distribuzione delle risposte, preferenza termica 09:45-55.

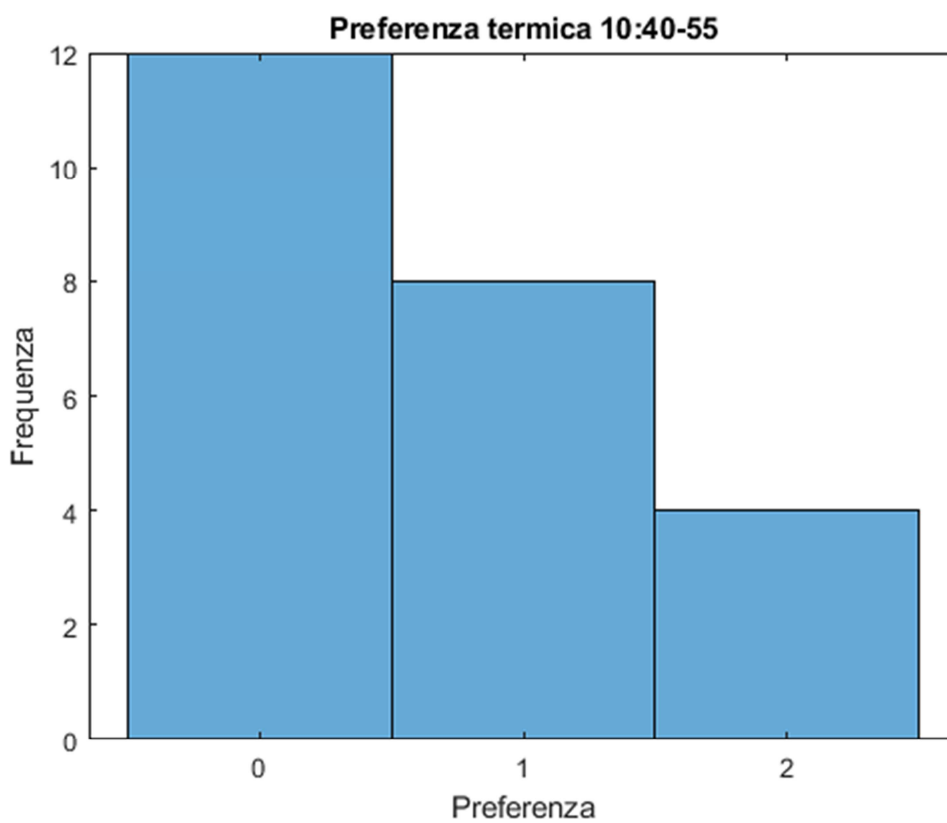


Figura 40- Distribuzione delle risposte, preferenza termica 10:40-55.

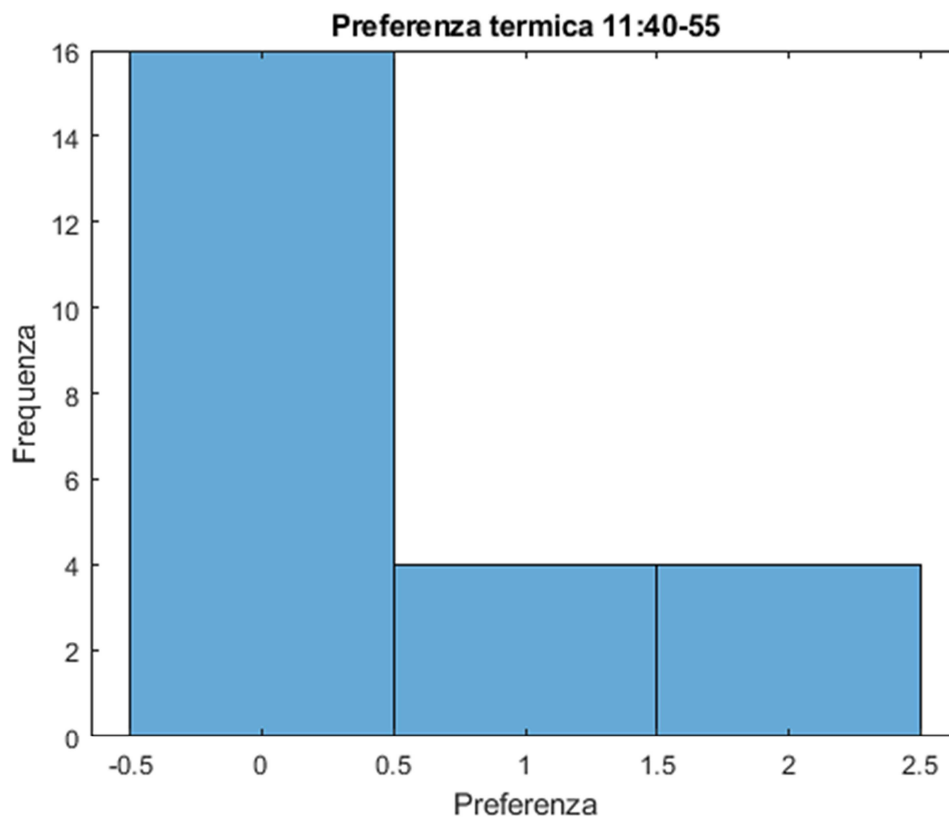


Figura 41- Distribuzione delle risposte, preferenza termica 11:40-55.

Di questo vengono calcolate mediana e chi-squared test.

5.2.4-Generazione delle risposte ai questionari: Valutazione Accettabilità

Stando alla tua preferenza personale, ritieni accettabile questo ambiente climatico?

-SI/NO . Per il quarto quesito si ottiene la seguente distribuzione (Figure 42,43,44,45):

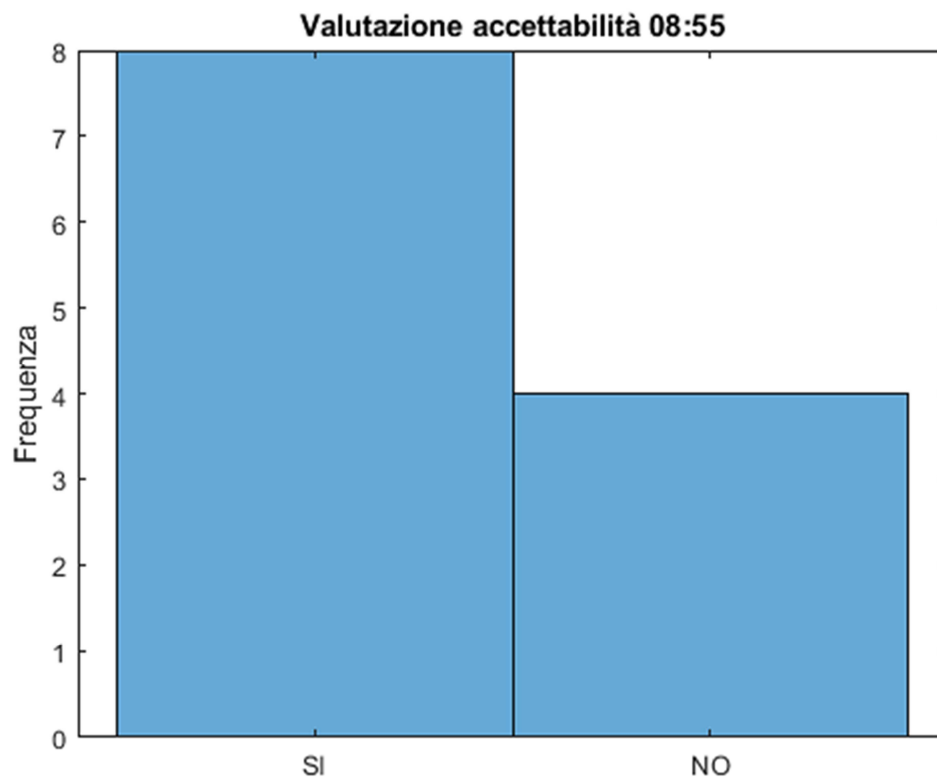


Figura 42- Distribuzione delle risposte, valutazione accettabilità 08:55.

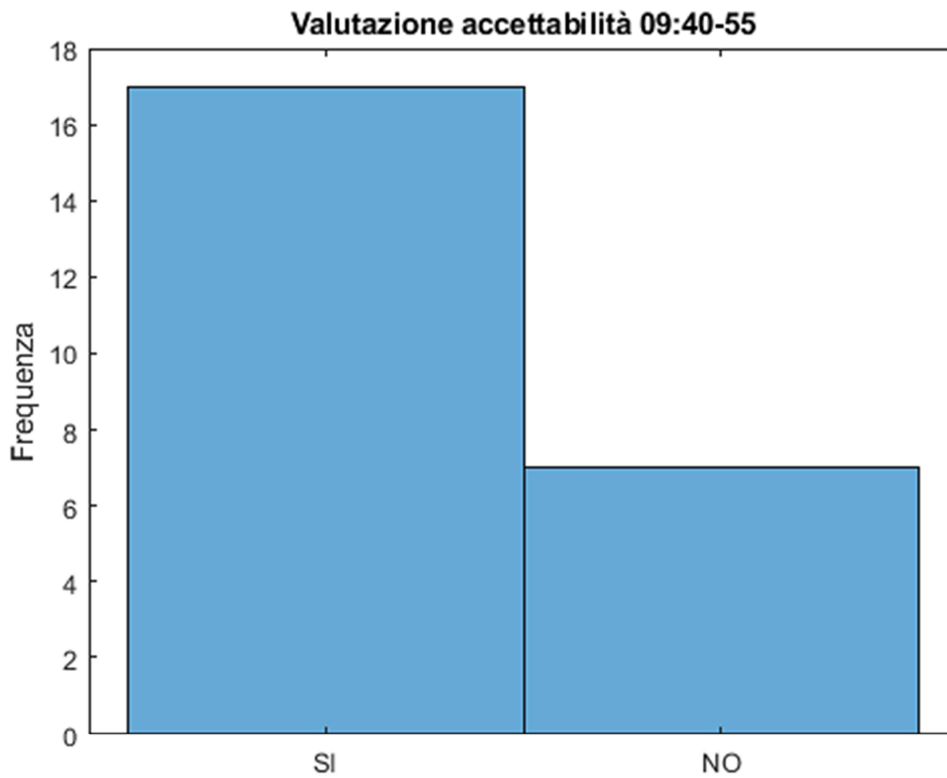


Figura 43- Distribuzione delle risposte, valutazione accettabilità 09:40-55.

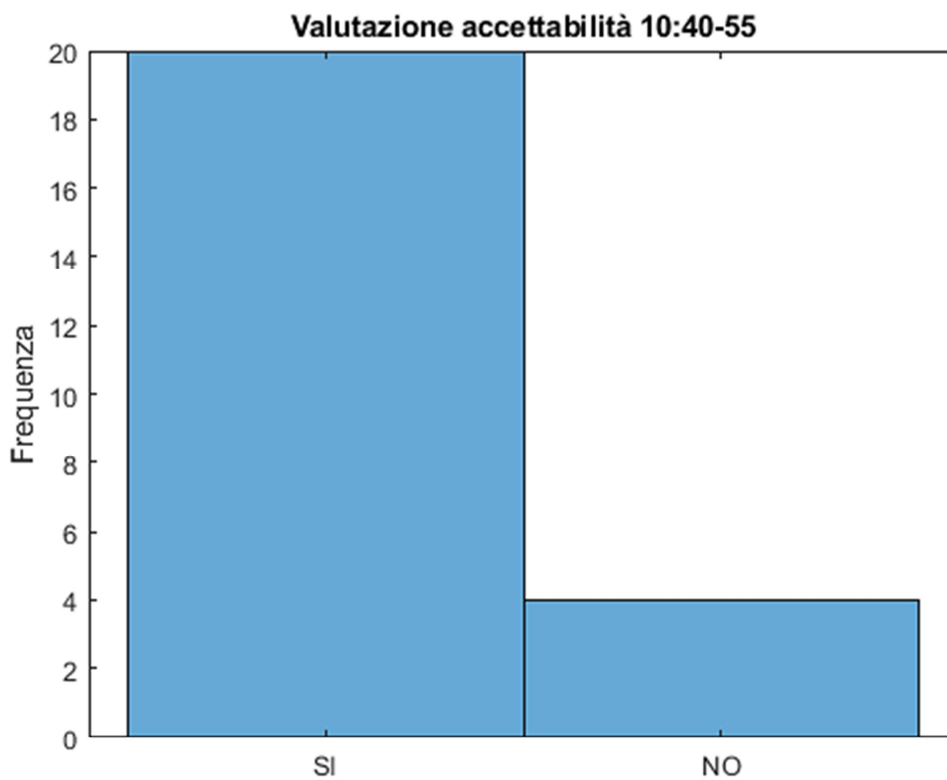


Figura 44- Distribuzione delle risposte, valutazione accettabilità 10:40-55.

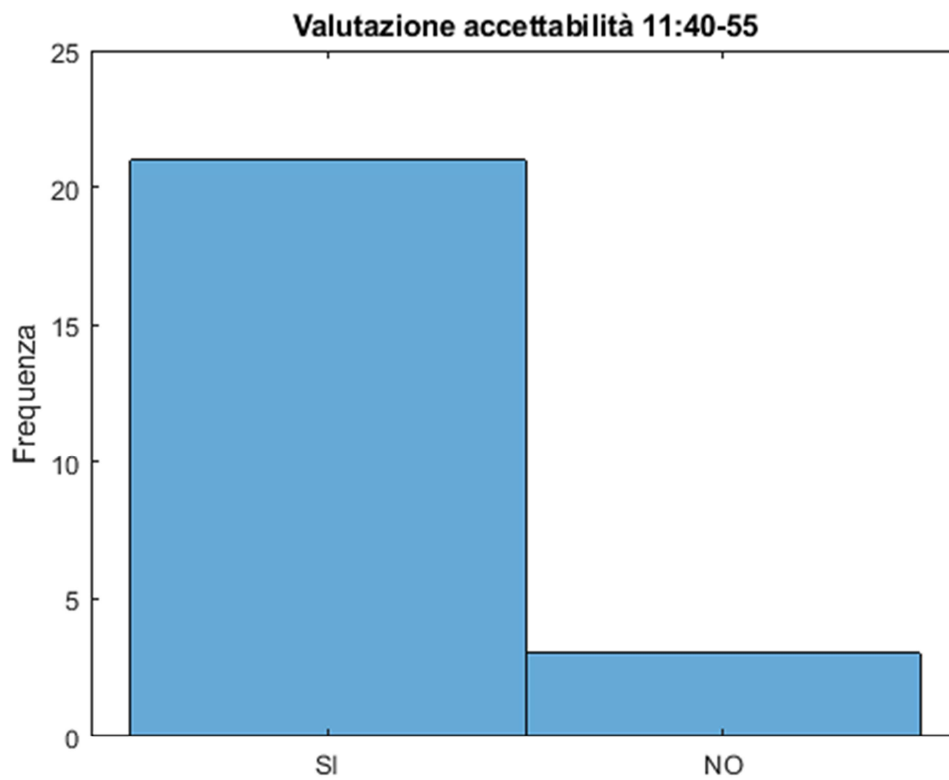


Figura 45- Distribuzione delle risposte, valutazione accettabilità 11:40-55.
Di questo vengono calcolate moda e % inaccettabilità.

5.2.5-Generazione delle risposte ai questionari: Tolleranza Personale

Giudichi questo ambiente...

-Da POLO 0(perfettamente tollerabile) a +4(intollerabile). Per il quinto quesito si ottiene la seguente distribuzione (Figure 46,47,48,49):

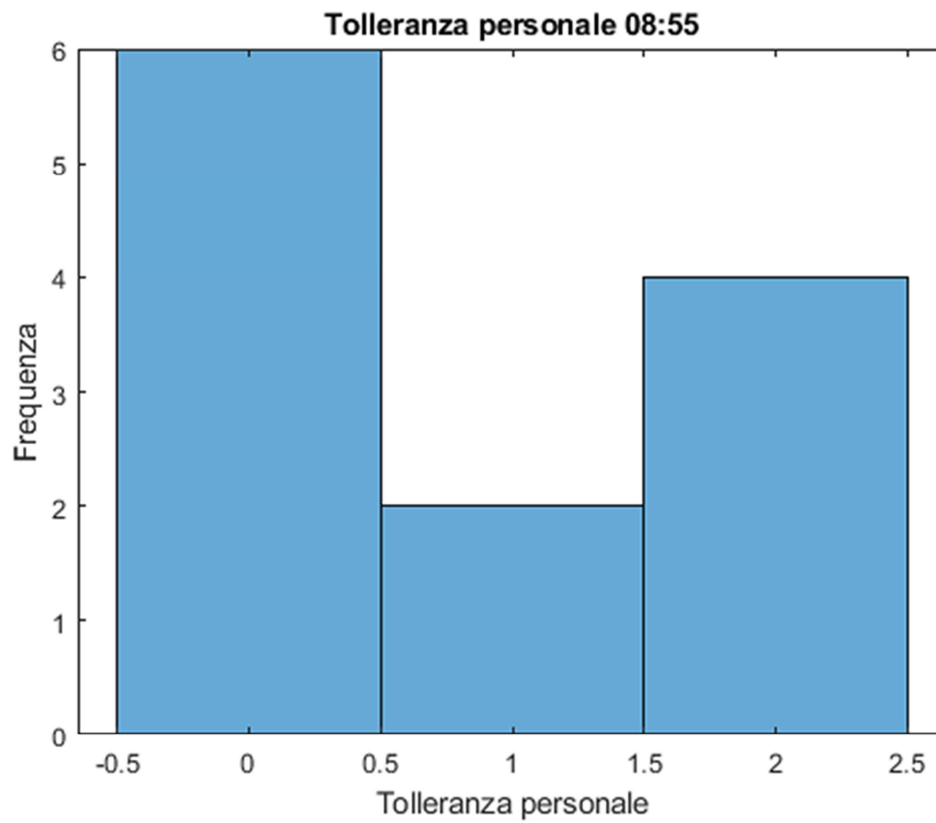


Figura 46- Distribuzione delle risposte, tolleranza personale 08:55.

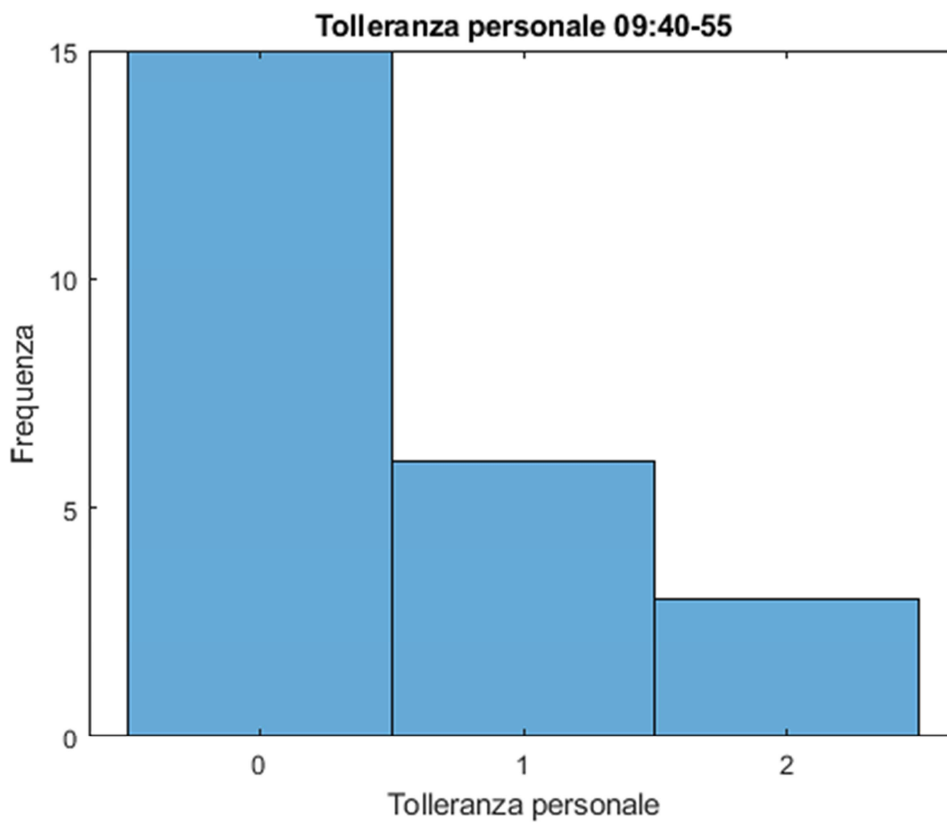


Figura 47- Distribuzione delle risposte, tolleranza personale 09:40-55.

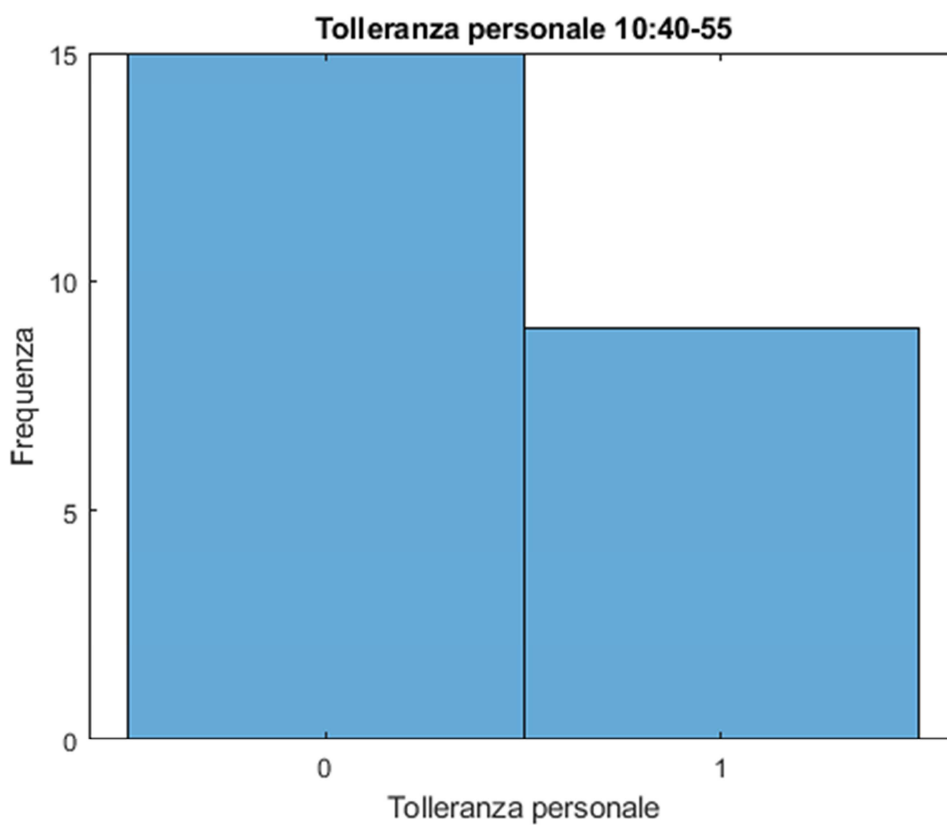


Figura 48- Distribuzione delle risposte, tolleranza personale 10:40-55.

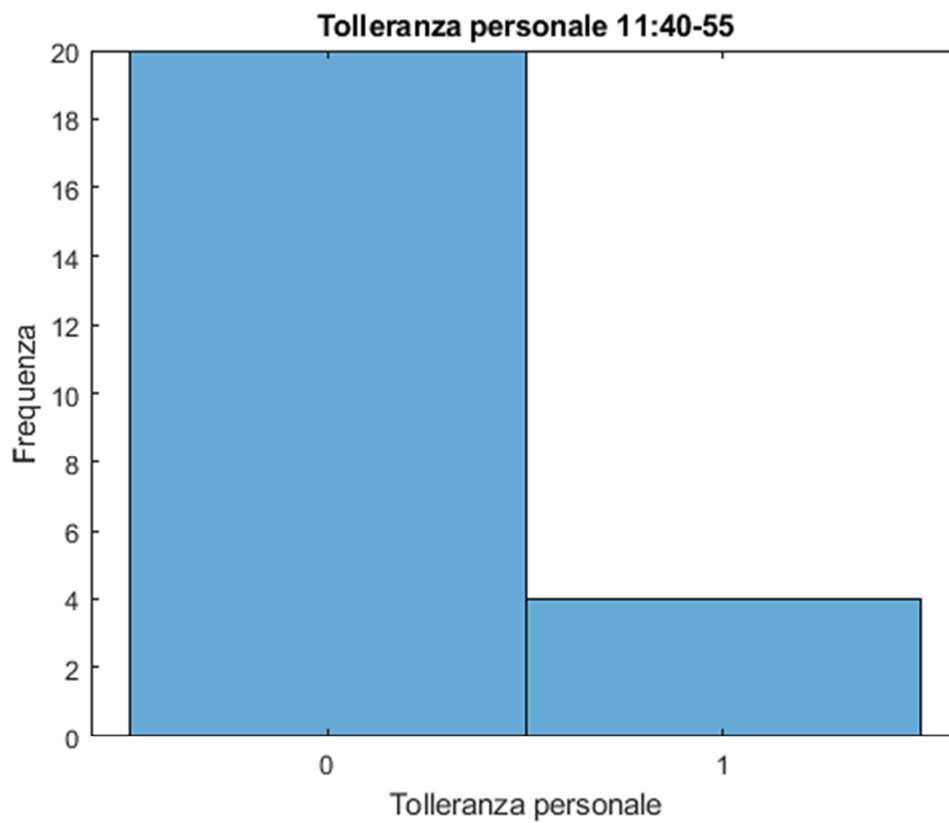


Figura 49- Distribuzione delle risposte, tolleranza personale 11:40-55.
Di essa viene calcolata la mediana.

5.3-Risultati dell'analisi statistica

La tabella seguente mostra i risultati numerici dell'analisi statistica.

n		08:55 12	09:40-55 24	10:40-55 24	11:40-55 24
Percezione termica	Media	-0,4	-0,4	-0,2	-0,3
	Dev.standard	0,9	0,9	0,8	0,6
	t-test	1	1	0	1
	p	0.0346 <0,05	0.0346 <0,05	0.2713 >0,05	0.0182 <0,05
Valutaz. soggettiva	Mediana	0	0	0	0
	% discomfort	12,5-41	12,5-37	12,5-41	0-25
Preferenza termica	Mediana	0	0	0	0
	Pref. verso:				
	Più caldo	6	14	12	8
	No cambio	6	10	12	16
	Più freddo	0	0	0	0
	χ^2	1	1	0	0
P	<,05	<,05	>,05	>,01	
Valutaz. accettabilità	Moda	SI	SI	SI	SI
	%inaccettab.	33	29	17	12,5
Tolleranza personale	Mediana	0	0	0	0

Figura 50-Risultati numerici dell'analisi statistica.

5.4-Conclusioni dello studio statistico delle risposte ai questionari

Dai risultati statistici ottenuti simulando le risposte ai questionari di una popolazione posta alle condizioni definite in precedenza, possiamo avere un'idea della valutazione globale del comfort termico percepito. Tali valori numerici vengono tradotti come segue, come previsto nella normativa UNI EN ISO 10551.

Otteniamo conferma di una media delle persone che trova già l'ambiente *termicamente neutrale* purché tendente al *leggermente freddo*.

A partire dalle 08:55 più della metà trova l'ambiente *confortevole*, arrivando a percentuali di discomfort inferiori al 25% dopo le 11:40.

Per quanto riguarda la preferenza termica nessun voto è stato assegnato ai valori che indicano il desiderio di avere un ambiente *più freddo*, mentre con una distribuzione di circa la metà degli individui, ci si divide tra chi non apporterebbe *nessun cambiamento* e chi gradirebbe un ambiente *più caldo*.

L'accettabilità è confermata con una percentuale di inaccettabilità che cala dal 33% delle 08:55 al 12,5% dell'ultima indagine, ed è opinione dei soggetti che l'ambiente sia *perfettamente tollerabile* o *appena difficile da tollerare*.

6-Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi è stato valutare attraverso un iniziale studio dei dati ambientali oggettivi secondo quali condizioni il benessere termico poteva essere raggiunto. Grazie all'analisi delle curve del Predicted Mean Vote ottenute nel periodo di monitoraggio della biblioteca San Giovanni (dal 9 dicembre 2019 al 2 gennaio 2020), si è giunti alla conclusione che per un'attività fisica che prevede un consumo metabolico $M = 1,2$ met (attività lavorativa sedentaria), i valori consigliati di isolamento termico del vestiario debbano essere compresi nell'intorno di $I_{cl} = 0,95$ clo, ovvero una combinazione di vestiario pesante per ambienti interni, in linea con il periodo stagionale nel quale lo studio è stato effettuato.

La seconda parte del lavoro di tesi ha avuto come scopo la costruzione di un questionario mediante delle scale di giudizio soggettive attraverso il quale valutare il comfort termico attraverso un'analisi statistica delle risposte. Per fare ciò, dopo aver definito la struttura del questionario e mantenendo i valori di M e I_{cl} (che sappiamo adatti a mantenere il comfort) ottenuti dalla valutazione dei dati ambientali, sono state generate delle risposte ai questionari simulando una popolazione di soggetti impegnati in un'attività lavorativa all'interno della biblioteca.

L'analisi statistica dei risultati simulati ha permesso di fare un training per il trattamento dei dati reali non appena sarà possibile distribuire i questionari alle persone che frequentano la biblioteca.

7-Bibliografia e sitografia

Normative

- N1. UNI EN ISO 7730-2003: *“Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico.”*
- N2. ASHRAE Standard 55-2004 *Thermal Environmental: “condizioni per l'occupazione umana.”*
- N3. ASHRAE 55-2010.
- N4. UNI EN ISO 10551: *“Ergonomia dell'ambiente fisico - Scale di giudizio soggettivo per la valutazione degli ambienti fisici.”*
- N5. UNI EN 4108-2: *“Thermal protection and energy economy in buildings - Part 2: Minimum requirements to thermal insulation.”*
- N6. UNI EN ISO 7730: *“Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.”*
- N7. UNI EN ISO 7726: *“Ergonomia degli ambienti termici: Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche.”*

Testi di riferimento

- T1. AIRNOVA Tech Solutions *“Il comfort termico”*.
- T2. INNOVA: Air tech instruments: *“Il comfort termico”*.
- T3. Prof. Arch. Giuliano Dall’O’ , Ing. Elisa Bruni, Arch. Ph.D. Annalisa Galante, -Arch. Angela Panza *“Comfort ambientale: i parametri fisici del comfort ambientale e gli indicatori”*
- T4. Prof. ing. Vittorio Betta *“IL BENESSERE*

TERMOIGROMETRICO NEGLI AMBIENTI MODERATI

- T5. Università Politecnica delle Marche - *Lezioni di Impianti Termotecnici*, Prof. Costanzo di Perna.
- T6. Giovanni Proietti Simonetti "*Microclima*"

Articoli Scientifici

- A.1 Sung Hyup Hong, Jong Man Lee, Jin Woo Moon and Kwang Ho Lee, Thermal Comfort, "Energy and Cost Impacts of PMVControl Considering Individual Metabolic RateVariations in Residential Building", *Energies* 2018, 11, 1767.

Siti internet

- S1. <https://biblus.acca.it/focus/benessere-termoigrometrico-e-comfort-termico/>
- S2. <http://ceae.colorado.edu/~brandem/aren3050/docs/ThermalComfort.pdf>
- S3. https://it.wikipedia.org/wiki/Comfort_ambientale
- S4. <https://www.rispostaserramenti.com/ashrae-nuovo-standard-per-il-comfort-termico/>
- S5. https://www.engineeringtoolbox.com/clo-clothing-thermal-insulation-d_732.html
- S6. <http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Carbonari-/materiali-1/claSA-06-0/17comfor1.pdf>