



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea triennale in **INGEGNERIA MECCANICA**

**INTEGRAZIONE DI SENSORI IN UN ROBOT  
SOCIALE PER LA MISURA DEL COMFORT**

**INTEGRATION OF SENSORS IN A SOCIAL  
ROBOT FOR COMFORT MEASUREMENT**

**Relatore:**

Prof. Gian Marco Revel

**Tesi di Laurea di:**

Samuele Borgognoni

**Correlatore:**

Dott. Ing. Nicole Morresi

A.A. 2023 / 2024

# Abstract

Il monitoraggio del comfort all'interno degli edifici è essenziale per garantire il benessere fisico e psicologico delle persone che occupano un ambiente indoor. Lo scopo di questo lavoro di tesi consiste nell'usare un robot sociale, Misty II, integrato con una rete di sensori per la misura di parametri ambientali come temperatura dell'aria, pressione sonora, umidità relativa, CO<sub>2</sub>, in ambiente multi-ufficio. Il robot interagisce attraverso un feedback vocale con gli occupanti in presenza di condizioni di discomfort, dando suggerimenti per migliorare tali condizioni e fornendo informazioni sui dati misurati. L'obiettivo principale è dimostrare l'utilità di un robot sociale nel mantenere condizioni indoor ottimali. A differenza dei sistemi totalmente automatizzati, questo approccio permette agli utenti di implementare le modifiche suggerite secondo le proprie esigenze, aumentando così la loro consapevolezza sulla qualità ambientale. Il sistema di misura è stato testato in un ambiente composto da tre uffici, ognuno equipaggiato con un sensore ambientale. Il robot è stato attivato per una settimana durante gli orari lavorativi. I risultati dell'esperimento indicano un miglioramento medio del comfort termico del 19.5%, 55.2% e 44.4% rispettivamente nelle tre stanze esaminate, ogni volta che gli utenti hanno seguito i suggerimenti del robot. Il Predicted Mean Vote semplificato (sPMV), indice con cui è stato valutato il comfort termico durante l'esperimento, è stato in media 0.27, 0.34 e 0.35 nelle tre stanze.

# Indice

<b>Capitolo 1: Introduzione</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1 Contesto</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2 Scopo del lavoro</b> .....	<b>7</b>
<b>1.3 Progetto VITALITY</b> .....	<b>8</b>
<b>1.4 Struttura della tesi</b> .....	<b>9</b>
<b>Capitolo 2: Il comfort indoor</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 Comfort termoigrometrico</b> .....	<b>10</b>
2.1.1 Bilancio termico del corpo umano .....	11
2.1.2 Potenza metabolica.....	12
2.1.3 Potenza meccanica del corpo umano.....	12
2.1.4 Potenza termica scambiata dal corpo umano.....	13
2.1.5 Indici di valutazione del comfort termoigrometrico .....	22
<b>2.2 Regolazioni del comfort termico</b> .....	<b>24</b>
2.2.1 Termoregolazione .....	24
2.2.2 Influenza dei fattori ambientali sul comfort termico.....	25
<b>Capitolo 3: Stato dell'arte</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 Robot per la misura del comfort e la regolazione automatica</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2 Robot per la misura del comfort e l'interazione con l'utente</b> .....	<b>28</b>
<b>Capitolo 4: Materiali e metodi</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1 Descrizione dell'esperimento</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2 Set-up di misura</b> .....	<b>30</b>
4.2.1 Robot sociale: Misty II.....	30
4.2.2 Stazione di sensori: Netatmo .....	32
4.2.3 Python: librerie e funzioni utilizzate.....	33
<b>4.3 Protocollo sperimentale</b> .....	<b>34</b>
<b>4.4 Moduli software per la misura dell'IEQ</b> .....	<b>38</b>
4.4.1 Periodo del ciclo .....	38
4.4.2 Acquisizione dati .....	38
4.4.3 Modulo "Comfort Range" .....	39
4.4.4 Modulo di Regolazione.....	40
4.4.5 Modulo per il Riconoscimento Discomfort .....	41
4.4.6 Modulo per pilotare Misty II .....	41
4.4.7 Modulo di interazione con l'utente .....	42

4.5 Analisi dati .....	42
<b>Capitolo 5: Risultati .....</b>	<b>44</b>
<b>Capitolo 6: Conclusioni .....</b>	<b>49</b>
<b>Riferimenti bibliografici .....</b>	<b>50</b>
<b>Appendici .....</b>	<b>51</b>
Appendice A .....	51
Appendice B .....	52
Appendice C .....	52
Appendice D .....	52
Appendice E.....	53
Appendice F.....	54

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - Tipi di comfort e la loro influenza sull'IEQ .....	10
Tabella 2 - Sensori presenti in Misty II .....	31
Tabella 3 - Sensori nelle basi Netatmo .....	32
Tabella 4 - Soglie di comfort indoor .....	36
Tabella 5 - HTTP request per i dati indoor e outdoor .....	39
Tabella 6 - Definizione degli indici per la valutazione dell'esperimento .....	43
Tabella 7 - Valori degli indici per la valutazione dell'esperimento .....	47

## Indice delle figure

Figura 1 - Metodi di trasmissione del calore nel corpo umano .....	13
Figura 2 - Potere emissivo di un corpo nero .....	16
Figura 3 - Coefficienti del modello aggiornato del PMV semplificato .....	23
Figura 4 - Metodi di termoregolazione del corpo umano .....	24
Figura 5 - Robot PeopleBot .....	26
Figura 6 - Robot e scheda VEX Cortex Microcontroller .....	27
Figura 7 - NAO Robot e strumenti di misura .....	28
Figura 8 - Il ciclo dell'esperimento. ....	30
Figura 9 - Sensori presenti in Misty II .....	32
Figura 10 - Netatmo, modulo di sensori indoor .....	33
Figura 11 - Mappa del percorso di Misty II .....	34
Figura 12 - Schema del protocollo dell'esperimento .....	35
Figura 13 - Foto di Misty II durante un'interazione .....	38
Figura 14 - Stanza A: Temperatura e sPMV nei quattro giorni .....	44
Figura 15 - Stanza B: Temperatura e sPMV nei quattro giorni .....	45
Figura 16 - Stanza C: Temperatura e sPMV nei quattro giorni .....	45
Figura 17 - Livello di concentrazione di CO2 nella stanza B .....	46

# Capitolo 1: Introduzione

## 1.1 Contesto

In media, si tende a trascorrere il 90% del proprio tempo all'interno di strutture o edifici [1]. La qualità dell'ambiente interno, dall'inglese Indoor Environmental Quality (IEQ), è un aspetto fondamentale che influisce significativamente sia sulla concentrazione e sulle performance lavorative delle persone che lo occupano [2], sia sulle loro condizioni di salute fisica [3]. L'IEQ è influenzato da quattro tipi di comfort: *termico*, o *termoigrometrico*, che comprende numerosi parametri, tra cui la temperatura dell'aria e l'umidità relativa; *sonoro*; *visivo*, nonché l'illuminazione; il comfort correlato alla *qualità dell'aria*, che tiene conto della concentrazione delle molecole inquinanti. Le normative italiane ed europee stabiliscono degli standard al di fuori dei quali è molto probabile che gli utenti non si trovino a loro agio. Tuttavia, soprattutto per il comfort termico, fattori soggettivi e dipendenti dall'individuo quali età, genere e massa corporea rendono le condizioni di benessere variabili; perciò, non è semplice raggiungere uno stato di comfort ideale [4].

È possibile regolare la qualità dell'ambiente indoor tramite vari metodi, tra cui la semplice apertura delle finestre o delle porte tramite ventilazione naturale, l'accensione delle luci, oppure l'impiego e l'attivazione di sistemi di riscaldamento, di ventilazione e di condizionamento dell'aria, i cosiddetti Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC). Per ridurre la necessità dell'intervento umano, negli anni sono stati sviluppati sistemi automatizzati che, tramite sensori, controllano in autonomia le condizioni ambientali.

Nonostante il largo impiego di tali sistemi automatici, o "Building Automation and Control Systems" (BACS), spesso questi non riescono a ricreare un comfort adatto alle necessità fisiche e alle preferenze dell'utente. I problemi principali possono essere due: il fatto che i sensori sono posizionati lontani dal singolo individuo e il fatto che questi sistemi si basano su indici generalizzati, quali il *Predicted Mean Vote* (PMV), i cui parametri non vengono misurati direttamente, ma per la maggior parte stimati con una certa approssimazione su una grande popolazione.

Come riporta lo studio [5], spesso gli occupanti tendono a preferire un controllo personale dei dispositivi HVAC, disattivando le impostazioni di auto-regolazione. In [6] si afferma che la regolazione manuale da parte dell'utente ha effetti psicologici maggiori rispetto al caso in cui le stesse condizioni fossero ottenute con una regolazione automatica. In particolare, si mostra come, in presenza di un forte discomfort, un lieve miglioramento delle condizioni indoor ottenuto per regolazione manuale porti a ridurre significativamente il malessere del soggetto, risultato che non si ottiene mediante regolazione automatica. A ciò si contrappongono i risultati di [5], secondo cui, invece, a parità di temperatura, la sensazione è la stessa nei due casi. Ad

ogni modo, la regolazione manuale rende possibile un migliore soddisfacimento delle esigenze individuali e soggettive. Per ottimizzare questo tipo di regolazione, la ricerca sta utilizzando metodi di coaching dell'utente, cosicché questo agisca in modo consapevole delle proprie esigenze e di quelle dell'edificio, in termini di efficienza energetica.

Il lato negativo della regolazione manuale, oltre alla necessità da parte dell'occupante di intervenire attivamente e con regolarità, è il fatto che il comportamento delle persone è *stocastico*, incostante e difficile da prevedere [7], nonostante gli individui tendano per loro natura ad assumere un comportamento che gli permetta di adattarsi e adattare l'ambiente circostante al fine di stabilire condizioni ottimali intorno a loro (in psicologia viene chiamato *comportamento adattivo*).

## 1.2 Scopo del lavoro

In questo lavoro di tesi, si utilizza un robot sociale dove convergono i dati da una rete di sensori ambientali installati in diversi uffici. Il robot misurerà e analizza i parametri che influenzano l'IEQ e, basandosi su questi, interagirà vocalmente con l'utente, fornendogli informazioni su eventuali discomfort ambientali e suggerimenti per migliorare la qualità indoor, sulla base dei range forniti dalle normative. In questo modo, il robot aiuterà l'utente a diventare più consapevole della qualità dell'ambiente circostante, lasciandogli comunque la libertà di adattare i consigli alle proprie esigenze e sensazioni personali.

Non si cerca di misurare direttamente i parametri fisiologici, come attività metabolica e resistenza termica dei vestiti, per stimare indici come il PMV, bensì si utilizzano dei range di comfort standardizzati per stabilire quando vi è una situazione di discomfort. Nonostante le stime che si fanno durante questa metodologia siano più approssimative rispetto al calcolo del PMV, possono essere corrette e adattate direttamente dal soggetto. In certi casi, né le predizioni che si basano sul calcolo di questo indice, né le condizioni di comfort stabilite dalle normative e dagli standard sono concordi con le effettive sensazioni delle persone. Come riporta lo studio [8], si possono verificare due casi qualitativi di disaccordo:

- *Caso 1*: l'utente non rileva una sensazione di discomfort, mentre i dati oggettivi sì
- *Caso 2*: l'utente percepisce un discomfort, mentre i dati oggettivi no

*Causa A* (per entrambi i “casi 1 e 2”)

In entrambe le casistiche appena riportate è possibile che i range di comfort delle normative o il PMV non tengano conto, o approssimino in modo inadeguato, dei fattori personali, fisiologici o emotivi [9].

*Causa B* (per il “caso 1”)

Quando però la differenza tra sensazione e risultati dei dati è troppo alta, è più probabile che l'utente non sia abbastanza sensibile o consapevole della condizione di discomfort. Ciò può causare un calo di concentrazione e di efficienza nei propri compiti a cui non fa caso.

La metodologia proposta nel presente studio permette di monitorare l'IEQ con costanza e in autonomia, e informare l'utente su eventuali discomfort oggettivi andando ad eliminare la “*Causa B*”, pur lasciandogli libertà nelle azioni di regolazione in base alle proprie sensazioni soggettive, eliminando di fatto anche la “*Causa A*”.

A differenza degli studi precedenti, qui si impiega un robot sociale che interagisce con l'utente in modo poco invasivo e integra più parametri IEQ rispetto ad altri studi. L'obiettivo è trovare un metodo versatile, adattabile a diversi tipi di ambienti, per superare i limiti degli indici predittivi, su cui si concentrano gli altri studi, e le sensazioni soggettive degli occupanti. Il robot non agisce direttamente sui sistemi di ventilazione, ma fornisce suggerimenti su come e quando farlo. L'utilizzo di un robot sociale si presta bene a contesti lavorativi, domestici e scolastici, e permette di facilitare l'interazione con l'utente nella vita di tutti i giorni [8].

Il metodo usato rappresenta il connubio tra un sistema di regolazione dell' IEQ automatico e uno manuale, assumendo i lati positivi di ognuno ed incontrando sia le sensazioni dell'utente, sia le necessità fisiologiche dello stesso al fine di migliorarne la produttività, la concentrazione e il benessere fisico-psicologico.

## 1.3 Progetto VITALITY

Questo lavoro fa parte del Progetto VITALITY – SPOKE 5 (Innovation, digitalisation and sustainability for the diffused economy in Central Italy) finanziato dall'Unione Europea tramite il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). È coordinato dall'UNIVPM e vi partecipano anche altri enti tecnologici e di ricerca della regione Marche. I fondi stanziati per lo SPOKE 5 ammontano a più di 9 milioni di euro. Il progetto si focalizza su cinque aree tematiche: edifici sostenibili centrati sulle persone, vita attiva e assistita, eco-sostenibilità dei prodotti per gli ambienti di vita, produzione sostenibile per l'industria degli ambienti di vita, modelli innovativi per la sostenibilità socio-economica delle aree rurali.

Quest'attività di ricerca ricade nella tematica del WP2, "Edifici sostenibili centrati sulle persone": in questo WP, infatti, si sviluppano soluzioni innovative e modelli che coniughino l'alta efficienza energetica degli edifici con il benessere e il comfort fisico-psicologico degli occupanti. L'obiettivo è impiegare strumenti di progettazione e misura che monitorino in tempo reale la salute delle persone dal punto di vista termico, visivo, acustico e della qualità dell'aria.

In questo modo, si punta a migliorare il benessere degli utenti senza trascurare la sostenibilità economica e ambientale degli edifici.

## **1.4 Struttura della tesi**

Nei seguenti paragrafi verrà per prima cosa approfondito il concetto di comfort indoor, addentrando nei principali aspetti teorici che vi sono alla base, dando particolare importanza agli aspetti fisici che ne rendono possibile la regolazione e descrivendo alcuni indici di valutazione del comfort che saranno utilizzati nell'analisi dei risultati dell'esperimento. Poi si presentano gli studi correlati che utilizzano robot e robot sociali per la misura e la regolazione dell'IEQ. Si prosegue con il descrivere i materiali usati per la realizzazione dell'esperimento, il protocollo sperimentale, la struttura del programma Python che si è sviluppato per elaborare i dati e azionare il robot, e la metodologia di analisi dei dati ottenuti. Infine, si discuteranno tali risultati, le conclusioni, i limiti dell'esperimento e alcuni spunti per future ricerche.

# Capitolo 2: Il comfort indoor

Il comfort indoor rappresenta il benessere fisiologico e psicologico di coloro che occupano un ambiente interno. Si possono distinguere quattro diversi tipi di comfort che comprendono vari parametri a loro volta e che, insieme, lo determinano. Li si riportano nella *Tabella 1*, assieme alla relativa influenza che ognuno di questi ha sull'IEQ, secondo i risultati dello studio [2].

Tipo di comfort	Influenza sull'IEQ
Comfort termico	36.5%
Comfort sonoro	30.7%
Qualità dell'aria	24.4%
Comfort visivo	8.4%

*Tabella 1 - Tipi di comfort e la loro influenza sull'IEQ*

Nell'esperimento considerato in questo lavoro di ricerca, è stato per semplicità trascurato il comfort visivo, non installando alcun sensore di illuminazione, poiché tale fattore influisce solo dell'8.4% nell'IEQ per via dell'illuminazione ormai in prevalenza artificiale, soprattutto negli uffici in cui si usano computer e monitor. Sono stati invece misurati i primi tre tipi di comfort.

Nei seguenti paragrafi si approfondirà l'aspetto *termico* in quanto non solo è il più influente, ma necessita di particolari spiegazioni teoriche.

## 2.1 Comfort termoigrometrico

Il benessere termoigrometrico è verificato quando le persone non percepiscono una sensazione psicologica né di caldo né di freddo. In particolare, lo si ha in condizione di *omeostasi*, per cui l'energia interna e la temperatura del corpo rimangono costanti. È in funzione di 6 parametri indipendenti, di cui 2 relativi dal soggetto e 4 all'ambiente circostante: metabolismo, resistenza termica dell'abbigliamento, temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità dell'aria e temperatura media radiante.

Si andranno ora ad approfondire i concetti teorici alla base del comfort termoigrometrico, esposti consultando principalmente [10], [11], [12] e le norme ISO 7726 e ISO 7730.

## 2.1.1 Bilancio termico del corpo umano

Il corpo umano è un sistema termodinamico aperto che scambia massa ed energia con l'ambiente circostante. Per funzionare correttamente e svolgere tutte le funzioni vitali, esso si deve mantenere dentro uno stretto intervallo di temperature, attorno ai 37°C. Si definisce “*termoregolazione*” la sua capacità di mantenere una temperatura costante, in modo *fisiologico* o *comportamentale*.

È possibile trattare il problema considerando i prodotti della massa scambiata (liquidi, cibo e scarti) in termini di energia e modellare quindi il corpo umano come un sistema termodinamico chiuso, dove quindi la massa scambiata è  $m = 0$ , l'energia interna alla massa scambiata è  $\sum_i m_i u_i = 0$  e la cui equazione di bilancio energetico è:

$$(1) \quad \Delta U = Q - W \quad [J]$$

dove  $\Delta U$  è la differenza di energia interna dovuta allo scambio totale di energia con l'ambiente, sottoforma di calore  $Q = \sum Q_i$  e lavoro  $W = \sum W_i$ . Per ipotesi,  $Q_i > 0$  se è entrante nel sistema (calore assorbito dal corpo) e  $W_i > 0$  se è uscente (lavoro svolto dal corpo).

Il calore si può scrivere come somma di quello prodotto dai processi *catabolici* e *anabolici* che compongono il metabolismo ( $Q_{met}$ ) e del calore scambiato con l'ambiente ( $Q_{diss}$ ) per conduzione, convezione, irraggiamento ed evaporazione dell'acqua in uscita dal corpo (tramite diffusione, sudorazione e respirazione). L'equazione di bilancio si riscrive dunque così:

$$(2) \quad \Delta U = Q_{met} + Q_{diss} - W \quad [J]$$

in cui il calore dissipato  $Q_{diss} < 0$ . Si noti che, in questa scrittura,  $Q_{diss}$  comprende sia il calore in uscita, sia il calore in entrata dall'ambiente.

La definizione di *variazione di energia interna* assume la forma:

$$(3) \quad dU = c_b \cdot m_b \cdot dT_b \quad [J]$$

in cui  $c_b$  è il *calore specifico* del corpo umano, nonché la quantità di energia che serve fornire per innalzarne la temperatura di 1°C. Considerando che il corpo umano è composto per la maggior parte di acqua e che  $c_{H_2O} = 4.184 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} = 1 \frac{Kcal}{kg \cdot ^\circ C}$ , si stima che  $c_b = 0.83 \frac{Kcal}{kg \cdot ^\circ C}$  [10].

Quindi si definisce  $P$  la variazione di energia interna del corpo umano per unità di superficie della pelle  $A_b$ :

$$(4) \quad P \triangleq \frac{1}{A_b} \frac{dU}{dt} = \frac{c_b m_b}{A_b} \frac{dT_b}{dt} \quad [W/m^2]$$

Da questa definizione, derivando la (2) rispetto al tempo e dividendola per la superficie corporea  $A_b$ , si ottiene:

$$(5) \quad P = \frac{\dot{Q}_{met}}{A_b} + \frac{\dot{Q}_{diss}}{A_b} - \frac{\dot{W}}{A_b} \quad [W/m^2]$$

Ai fini della termoregolazione, la variazione di temperatura corporea si deve mantenere pressoché nulla:

$$dT_b = 0 \rightarrow dU = 0 \rightarrow P = 0$$

Nei casi in cui  $P > 0$ , il corpo possiede, grazie alle reazioni che compongono il metabolismo e alla componente di  $\dot{Q}_{diss}$  entrante, una potenza maggiore di quanta ne riesca a smaltire tramite lavoro meccanico (movimento) o per dissipazione termica: si ha quindi la sensazione di *caldo*. Invece,  $P < 0$  quando il corpo dissipa più energia nell'unità di tempo rispetto a quella che riesce a produrre: si ha in questo caso la sensazione di *freddo*.

## 2.1.2 Potenza metabolica

La *potenza metabolica*  $\dot{Q}_{met}$  (o *metabolic rate*, MR) è generata da reazioni biochimiche a partire dal cibo che ingeriamo. Dipende dalla massa corporea, dal genere, dall'età e soprattutto dall'attività fisica. La potenza metabolica *basale*  $\dot{Q}_{met,basale}$  o BMR è quella necessaria al solo sostentamento degli organi vitali e si misura sul soggetto disteso, sveglio, in equilibrio termico con l'ambiente e a digiuno da 12 ore. Maggiore il peso corporeo e maggiore sarà la BMR. La  $\dot{Q}_{met}$ , invece, cresce parabolicamente con l'aumentare dell'attività fisica. Per il lavoro da ufficio, di interesse per l'esperimento, si stima  $\frac{\dot{Q}_{met}}{A_b} = 70 \frac{W}{m^2}$ .

## 2.1.3 Potenza meccanica del corpo umano

Una percentuale della potenza metabolica viene impiegata per il movimento. Tale rapporto è definito *rendimento meccanico istantaneo* del corpo umano:  $\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{met}}$ . In base all'attività svolta, il rendimento può aumentare, non superando in genere lo 0.2. In condizioni statiche si può considerare  $\eta \approx 0$ .

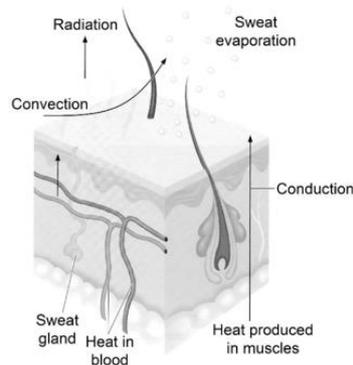
La potenza rimanente, ovvero  $\dot{Q}_{met} - \dot{W} = (1 - \eta) \dot{Q}_{met}$  viene scambiata sottoforma di potenza termica, entrante o uscente, al fine di mantenere il bilancio neutro  $P = 0$  e  $dT_b = 0$ .

## 2.1.4 Potenza termica scambiata dal corpo umano

La trattazione della potenza termica scambiata dal corpo umano  $\dot{Q}_{diss}$  è più articolata, in quanto si manifesta per mezzo di vari fenomeni di trasferimento del calore (*Figura 1*):

- Convezione  $\dot{Q}_{conv}$
- Conduzione  $\dot{Q}_{cond}$
- Irraggiamento  $\dot{Q}_{irr}$
- Evaporazione dell'acqua diffusa attraverso la pelle  $\dot{Q}_{diff}$
- Evaporazione del sudore  $\dot{Q}_{sw}$
- Evaporazione dell'acqua tramite respirazione  $\dot{Q}_{bre} = \dot{Q}_{bre,SENS} + \dot{Q}_{bre,LAT}$

$$\dot{Q}_{diss} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{irr} + \dot{Q}_{diff} + \dot{Q}_{sw} + \dot{Q}_{bre,SENS} + \dot{Q}_{bre,LAT}$$



*Figura 1 - Metodi di trasmissione del calore nel corpo umano*

### 2.1.4.1 Scambio per convezione

La trasmissione del calore per convezione è veicolata dal moto di un fluido. Portando l'esempio del corpo umano, l'aria intorno alla superficie, generalmente a temperatura minore di quella corporea, asporta calore andando ad aumentare l'energia interna del volume fluido a contatto con la pelle. Più la velocità dell'aria è alta, maggiore sarà il ricambio di volume di fluido a contatto e maggiore sarà il calore asportato nell'unità di tempo.

In generale, la potenza termica asportata per convezione si esprime tramite la seguente relazione:

$$(6) \quad \dot{Q}_{conv} = -h \cdot A_S \cdot (T_{\infty} - T_S) \quad [W]$$

dove:

$h = \left[ \frac{W}{K m^2} \right]$  : coefficiente unitario di convezione

$A_S = [m^2]$ : superficie di scambio

$T_{\infty} = [K], [^{\circ}C]$ : temperatura del fluido alla distanza  $d_{\infty}$  dalla superficie tale per cui il moto del fluido non è influenzato dalla presenza della superficie; confine dello *strato limite*

$T_S = [K], [^{\circ}C]$ : temperatura della superficie di scambio (nel caso di interesse temperatura della pelle, a soggetto nudo, altrimenti temperatura dell'abbigliamento).

Nella (6) si è scritto il segno negativo affinché  $\dot{Q}_{conv} < 0$ , per sottolineare che, nell'ipotesi di interesse in cui  $T_S > T_{\infty}$ , il calore è trasferito dal sistema a temperatura maggiore a quello a temperatura minore, nel rispetto del *Secondo Principio della Termodinamica*.

Il coefficiente  $h$  tiene conto della geometria e rugosità della superficie e delle caratteristiche termodinamiche del fluido. Varia significativamente tra liquidi e gas, e tra convezione naturale e forzata.

Nella *convezione naturale*, il flusso del gas o del liquido è verticale ed è causato da gradienti di temperatura che inducono le aree del volume fluido a variare densità per via del fenomeno della *dilatazione termica*. Le zone a temperatura minore e maggiore densità, in presenza di un campo gravitazionale, vengono attratte verso il basso, spingendo in alto quelle a maggiore temperatura e minore densità secondo il *Principio di Archimede*.

Nella *convezione forzata*, il movimento del fluido è causato da una fonte di lavoro esterna, ad esempio una pompa, per l'acqua, o le pale di un ventilatore, per l'aria.

$h$  è molto minore nei casi di convezione naturale e tramite gas, in cui il calore viene scambiato lentamente. È invece maggiore dei casi di convezione forzata e per mezzo di liquidi.

Le differenze nei metodi di determinazione di  $h$  per la convezione naturale e quella forzata derivano principalmente dalle diverse modalità di movimento del fluido e dai regimi di flusso caratteristici di ciascuna forma di convezione. La convezione forzata implica un controllo più diretto della velocità del fluido e dei profili di flusso, laminare o turbolento. La convezione naturale è influenzata maggiormente da fenomeni di densità e da condizioni ambientali locali in cui il regime di flusso e la velocità del fluido sono difficilmente determinabili.

La norma ISO 7730 individua le seguenti formulazioni per determinare  $h$  - relativo ovviamente all'aria interna all'edificio - che tengono conto sia della convezione forzata, sia di quella naturale in condizioni indoor:

$$h = \begin{cases} 2.38 \cdot (T_{cl} - T_a)^{0.25} & \text{se } 2.38 \cdot (T_{cl} - T_a)^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}} & \text{se } 2.38 \cdot (T_{cl} - T_a)^{0.25} < 12.1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

dove:

$T_{cl} = [^{\circ}C]$ : temperatura dell'abbigliamento

$T_a = [^{\circ}C]$ : temperatura dell'aria

$v_{ar} = [m/s]$ : velocità relativa tra aria e corpo.

$h$  così ottenuto va utilizzato nella seguente formulazione, analoga alla (6), che tiene conto della superficie vestita:

$$(7) \quad \frac{\dot{Q}_{conv}}{A_S} = -h \cdot f_{cl} \cdot (T_a - T_{cl}) \quad [W/m^2]$$

in cui  $f_{cl} = \frac{A_{cl}}{A_S}$ , con  $A_{cl}$  la superficie vestita e  $A_S$  la superficie totale della pelle.

La norma sceglie  $f_{cl}$  a seconda della resistenza termica dell'abbigliamento  $I_{cl} [m^2 \text{ } ^{\circ}C/W]$  :

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot I_{cl} & \text{se } I_{cl} \leq 0.078 \text{ } m^2 \text{ } ^{\circ}C/W \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} & \text{se } I_{cl} > 0.078 \text{ } m^2 \text{ } ^{\circ}C/W \end{cases}$$

### 2.1.4.2 Scambio per irraggiamento

Il fenomeno dell'irraggiamento termico è dovuto al fatto che ogni corpo *emette* uno spettro di onde elettromagnetiche in base alla propria temperatura. Poiché le onde elettromagnetiche non hanno bisogno di un mezzo per essere veicolate, si può avere questo tipo di scambio termico anche nel vuoto e indipendentemente dalla distanza.

In natura, un corpo può comportarsi in diversi modi rispetto alle onde elettromagnetiche che lo irradiano, a seconda della loro lunghezza d'onda. Può rifletterle, in modo speculare o diffuso. Può assorbirle e trasformare l'energia così ottenuta in altri tipi, tra cui in energia termica. Può emetterle.

Approfondendo l'*emissione termica*, ogni corpo reale possiede una certa temperatura e un'*energia termica*, che rappresenta l'energia cinetica media delle particelle che lo compongono. In base a questa, gli elettroni di ogni atomo sono più o meno eccitati. Questi tendono a stati energetici minori e più stabili, quindi passano a livelli atomici inferiori cedendo una precisa e *discreta* quantità di energia, corrispondente al "salto energetico" effettuato, sottoforma di *fotoni*. Gli elettroni sono dunque modellabili come *oscillatori armonici*, che emettono ed assorbono continuamente onde elettromagnetiche.

La potenza emessa per irraggiamento è descritta usando la *Legge di Plank*, il quale risolse, con questa, il “problema del corpo nero”. Un oggetto reale emette onde elettromagnetiche solo a determinate frequenze. Un *corpo nero*, invece, è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione incidente su di esso e la riemette con uno spettro infinito di frequenze. La potenza emessa dipende solo dalla sua temperatura. Prima di Plank, Rayleigh e Jeans ricavarono una relazione che permetteva di rappresentare la potenza irradiata da un corpo nero. Tale relazione, però, si rivelò efficace solo per descrivere una parte di spettro emesso, quella a basse frequenze. Invece, per alte frequenze questo modello stabiliva una potenza emessa infinita, insostenibile fisicamente (cosiddetta “catastrofe ultravioletta”). Plank risolse questo problema, intuendo che lo spettro fosse emesso in maniera discreta e suddiviso in “quanti” (o fotoni), con un’energia  $e$  quantizzata e proporzionale alla frequenza  $\nu$  della radiazione:  $e = h \nu$ , dove  $h$  è la costante di Plank. La nuova formulazione del *potere emissivo* di un corpo nero per una specifica lunghezza d’onda è:

$$(8) \quad E_{bb}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad [W/m^2 \mu m]$$

dove:

$h = [J \cdot s]$ : costante di Plank

$c = [m/s]$ : velocità della luce nel mezzo

$\lambda = [\mu m]$ : lunghezza d’onda

$k = [J/K]$ : costante di Boltzmann

$T = [K]$ : temperatura del corpo nero

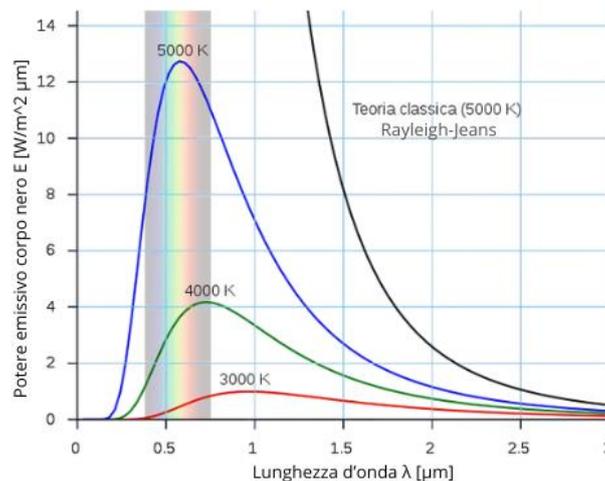


Figura 2 - Potere emissivo di un corpo nero

Dalla *Figura 2* si può apprezzare la differenza tra il modello innovativo di Plank e quello precedente. Inoltre, si nota come il potere emissivo abbia un picco che cresce con la temperatura. Questo picco, per il corpo umano, si ha attorno ai  $9.32 \mu m$ , nello spettro dei raggi infrarossi. Quello del Sole, è nello spettro della luce visibile, attorno ai  $0.5 \mu m$ .

Integrando la (8) sulla lunghezza d'onda, si ottiene il *potere emissivo totale* di un corpo nero per l'intero spettro, nonché la *Legge di Stefan-Boltzmann*:

$$(9) \quad E_{bb}(T) = \int_0^{\infty} E_{bb}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad [W/m^2]$$

in cui  $\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$  è la costante di Stefan-Boltzmann.

È importante sottolineare che in natura sono pochi i corpi approssimabili ad un corpo nero. Dunque, si definisce *emissività totale*  $\varepsilon$  di un corpo reale il rapporto tra il potere emissivo totale del corpo reale  $E(T)$  e quello del corpo nero alla sua stessa temperatura  $E_{bb}(T)$ .

$$\varepsilon(T) \triangleq \frac{E(T)}{E_{bb}(T)}$$

Da cui si deriva, usando la (9):

$$(10) \quad E(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad [W/m^2]$$

Con tali strumenti è possibile determinare la potenza termica scambiata per irraggiamento tra il corpo umano e le pareti dell'ambiente indoor in cui si trova. Si consideri sia la potenza emessa in ogni direzione dagli indumenti, sia quella assorbita dagli stessi e derivante dagli altri corpi a contatto visivo.

$$(11) \quad \begin{aligned} \dot{Q}_{irr} &= A_{eff} [E_{cl}(T_{cl}) - E_{room}(T_{room})] = [W] \\ &= A_{eff} \sigma (\varepsilon_{cl} T_{cl}^4 - \varepsilon_{room} T_{MR}^4) \end{aligned}$$

dove:

$A_{eff} = [m^2]$ : area efficace del corpo umano attraverso cui avviene l'irraggiamento

$\varepsilon_{cl}$ : emissività totale dell'abbigliamento ( $\approx 0.97$ )

$\sigma = [W/m^2K^4]$ : costante di Stefan-Boltzmann

$T_{cl} = [K]$ : temperatura dell'abbigliamento, assimilabile alla temperatura della pelle  $T_{sk}$

$T_{MR} = [K]$ : temperatura media radiante.

La *temperatura media radiante*  $T_{MR}$  è la media ponderata delle temperature di tutte le superfici e degli oggetti in contatto visivo con il soggetto. Nella (11), quindi, è come se si considerasse che lo scambio radiativo in una stanza cubica con le pareti omogenee, tutte alla stessa temperatura  $T = T_{MR}$ . Vari metodi sono possibili per ottenere la  $T_{MR}$ , parte dei quali sono trattati dallo studio [13]. Il primo è misurarla direttamente con l'apposito strumento di misura, il globotermometro. Un secondo, usato dal software EnergyPlus, è la media ponderata così ottenuta:

$$T_{MR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i T_i^4 F_i}{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i T_i^4}}$$

$N$ : numero di pareti della stanza

$T_i = [K]$ : temperatura della parete  $i$ -esima

$F_i$ : fattore di vista della parete  $i$ -esima, rappresenta quanto il corpo “vede” la superficie  $i$ -esima

$\varepsilon_i$ : emissività della superficie  $i$ -esima.

Solitamente, per le applicazioni pratiche, nella (11) si usa la semplificazione  $\varepsilon_{sk} \approx \varepsilon_{room}$ :

$$(12) \quad \dot{Q}_{irr} = A_{eff} \sigma (T_{cl}^4 - T_{MR}^4) \quad [W]$$

Ponendo:

$$A_{eff} \triangleq A_b f_{cl} f_{eff}$$

$A_b = [m^2]$ : superficie totale del corpo

$f_{cl}$ : coefficiente di abbigliamento

$f_{eff} \triangleq A_{eff}/A_{cl}$ : coefficiente di area efficace, solitamente circa  $f_{eff} \approx 0.72$

si ottiene:

$$(13) \quad \dot{Q}_{irr} = A_b f_{cl} f_{eff} \sigma (T_{cl}^4 - T_{MR}^4) \quad [W]$$

In questo modo, utilizzando i valori citati, la ISO 7730 stima la potenza termica scambiata per irraggiamento su unità di superficie corporea con:

$$(14) \quad \frac{\dot{Q}_{irr}}{A_{sk}} = 3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} (T_{cl}^4 - T_{MR}^4) \quad [W/m^2]$$

Per concludere il paragrafo, è bene sottolineare che nelle applicazioni pratiche di interesse per il comfort indoor la determinazione della potenza irradiata dal corpo umano è un fattore difficile da calcolare con precisione. Pur impiegando il metodo di misura diretta tramite un globotermometro, è difficile calcolarla in modo personalizzato al singolo utente. Infatti, questo fattore dipende fortemente dalla posizione del soggetto all'interno dell'ambiente e varia a seconda dei gradienti di temperatura delle superfici e del fattore di vista tra soggetto e pareti. Inoltre, una fonte di notevole discomfort localizzato spesso può essere la vicinanza di una finestra non coperta da persiane o tapparelle, il cui vetro si lascia attraversare direttamente dalla radiazione solare.

### 2.1.4.3 Scambio per conduzione

Lo scambio termico per conduzione avviene per mezzo di un corpo solido. Nel caso di interesse è dovuto al contatto diretto tra corpo umano e superfici di appoggio. È veicolato ad esempio dall'appoggio sulle soles delle scarpe, sulla sedia o dal contatto con oggetti tenuti in mano. A volte è possibile considerarne l'effetto, andando a modificare la resistenza termica dell'abbigliamento. Nella maggioranza dei casi inerenti al comfort termico questo termine è trascurabile; quindi, non ci si addenterà oltre nell'argomento.

### 2.1.4.4 Scambio per diffusione del vapore acqueo

Una parte dell'acqua presente nel corpo umano diffonde attraverso la pelle e raggiunge la superficie. Qui evapora assorbendo energia termica sia dalla pelle stessa, sia dall'ambiente. A differenza della sudorazione, che si tratterà in seguito, questo non è un processo regolato dalle ghiandole corporee, ma avviene spontaneamente.

La quantità di acqua che diffonde attraverso la pelle segue la *Prima Legge di Fick*; perciò, dipende linearmente dal gradiente di concentrazione di acqua tra l'interno dei tessuti della pelle e l'aria umida nell'ambiente. La portata massica di acqua diffusa, a meno di una costante correttiva riportata nello studio [14], è:

$$(15) \quad \dot{m}_{H_2O} = k (p_{VS,sk} - p_{V,a}) \quad [kg/s]$$

$k = [kg/(Pa s)]$ : permeabilità della pelle alla diffusione dell'acqua

$p_{VS,sk} = [Pa]$ : pressione di saturazione del vapore acqueo alla temperatura della pelle

$p_{V,a} = [Pa]$ : pressione del vapore acqueo a temperatura dell'aria

Dalla  $p_{VS,sk}$  dipende la quantità di acqua presente nella pelle e dalla  $p_{V,a}$  dipende la quantità di vapore acqueo presente nell'aria. La differenza  $p_{sk} - p_a$  sottolinea la relazione tra diffusione e differenza di concentrazione di acqua. Difatti, quando l'aria ambientale è "calda" e "molto umida", si tende a sentire più caldo, poiché la dissipazione per diffusione è minore.

L'*umidità relativa*  $\varphi$  confronta la quantità di vapore acqueo presente nell'aria umida con la quantità di vapore massimo che l'aria può contenere a tali condizioni di temperatura e pressione prima che diventi satura, cioè prima che si presentino gocce di liquido.

$$\varphi \triangleq \frac{m_V}{m_{VS}} = \frac{\rho_V}{\rho_{VS}} = \frac{p_V}{p_{VS}}$$

$m_V = [kg]$ ;  $\rho_V = \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ ;  $p_V = [Pa]$ : massa, densità e pressione del vapore, ad una determinata temperatura

$m_{VS} = [kg]$ ;  $\rho_{VS} = \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ ;  $p_{VS} = [Pa]$ : massa, densità e pressione del vapore saturo, ad una determinata temperatura

Nella relazione precedente si è usata la relazione dei gas perfetti, considerando il vapore acqueo tale.

È importante notare che la pressione di vapore acqueo alla temperatura ambiente è ben diverso dalla pressione ambientale:  $p_{V,a} \neq p_a$ . Infatti, la pressione totale dell'aria umida ambientale  $p_a$  è data dalla somma della pressione del vapore acqueo  $p_{V,a}$  e quella dell'aria secca  $p_{as}$ , secondo la *Legge delle pressioni parziali di Dalton*:  $p_a = p_{as} + p_{V,a}$ . Quindi  $p_{V,a}$  è difficile da determinare. È più comodo sostituire alla (15) l'uguaglianza  $p_{V,a} = \varphi p_{VS,a}$ . In questo modo  $p_{VS,a}$  la si ricava con l'uso di apposite tabelle in base alla temperatura e  $\varphi$  la si misura con strumenti dedicati, quali l'*igrometro*. Si ottiene, [12]:

$$(16) \quad \dot{m}_{H_2O} = k (p_{VS,sk} - \varphi p_{VS,a}) \quad [kg/s]$$

A questo punto, si scrive la potenza dissipata per vaporizzazione dell'acqua diffusa, per unità di superficie corporea. Tale scambio avviene sottoforma di calore latente, non sensibile. L'acqua diffusa sfrutta tutta la potenza assorbita per il passaggio di stato, non per aumentare la propria temperatura.

$$(17) \quad \frac{\dot{Q}_{diff}}{A_b} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{A_b} r = \frac{k}{A_b} r (p_{VS,sk} - \varphi p_{VS,a}) \quad [W/m^2]$$

$A_b = [m^2]$ : superficie corporea

$r = [J/kg]$ : calore latente di vaporizzazione dell'acqua  $\approx 2.406 \cdot 10^6 J/kg$  per  $T_{sk} = 35^\circ C$

$k = [kg/(Pa s)]$ : permeabilità della pelle alla diffusione dell'acqua

$p_{VS,sk} = [Pa]$ : pressione di saturazione del vapore acqueo alla temperatura della pelle

$p_{VS,a} = [Pa]$ : pressione di saturazione del vapore acqueo alla temperatura ambiente

$\varphi$ : umidità relativa

Usando i valori noti, la normativa riporta tale equazione:

$$\frac{\dot{Q}_{diff}}{A_b} = 3.05 \cdot 10^{-3} \left[ 5733 - 6.99 \left( \frac{\dot{Q}_{met}}{A_b} - \frac{W}{A_b} \right) - \varphi p_{VS,a} \right] \quad [W/m^2]$$

#### 2.1.4.5 Scambio per sudorazione

Il sudore è una soluzione di acqua, sali e altre sostanze di scarto che viene secreto dalle ghiandole sudoripare controllate dal sistema nervoso autonomo, in particolare dall'ipotalamo. Quando il sudore raggiunge la superficie della pelle, assorbe energia termica sottoforma di

calore latente dalla pelle e dall'ambiente, ed evapora. Il modello fisico è lo stesso utilizzato nel paragrafo precedente:  $\dot{Q}_{sw} = \dot{m}_{H_2O} r$ , dove  $r$  è il calore latente di vaporizzazione e  $\dot{m}_{H_2O}$  è la portata massica di acqua contenuta nel sudore. Il problema pratico sta nel determinare  $\dot{m}_{H_2O}$ . La formulazione empirica usata dalle normative mette in relazione la potenza dissipata per sudorazione con l'attività metabolica  $\dot{Q}_{met}$  e la potenza meccanica svolta  $\dot{W}$ :

$$(18) \quad \frac{\dot{Q}_{sw}}{A_b} = 0.42 \left( \frac{\dot{Q}_{met}}{A_b} - \frac{\dot{W}}{A_b} - 58.2 \right) \quad [W/m^2]$$

### 2.1.4.6 Scambio per respirazione

Durante la respirazione, le parti del corpo coinvolte scambiano calore con l'aria ambientale sottoforma di calore sia latente, sia sensibile. Quando l'aria ambientale viene inspirata nelle mucose, viene riscaldata dal corpo, presupponendo che la temperatura ambientale sia minore di quella corporea. Il calore scambiato è sensibile e, sull'unità di tempo, si quantifica con il bilancio energetico della massa d'aria inspirata, considerandola gas perfetto:

$$(19) \quad \begin{aligned} \dot{Q}_{bre,SENS} &= \dot{m}_a \Delta h_a = \dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,IN} - T_{a,OUT}) = \\ &= \rho_a \dot{V}_a c_{p,a} (T_{a,IN} - T_{a,OUT}) \end{aligned} \quad [W]$$

dove:

$\Delta h_a = [J/kg]$ : salto di entalpia specifica dell'aria

$\rho_a = [kg/m^3]$ : densità dell'aria a temperatura ambiente

$\dot{V}_a = [m^3/s]$ : portata volumetrica di aria inspirata

$c_{p,a} = [J/kg]$ : calore specifico a pressione costante dell'aria

$T_{a,OUT} = [K], [^\circ C]$ : temperatura dell'aria in uscita  $\approx T_b$  (temperatura corporea)

$T_{a,IN} = [K], [^\circ C]$ : temperatura dell'aria in ingresso

Quando l'aria arriva nei polmoni, la sua *umidità assoluta* aumenta, poiché le gocce di acqua nelle pareti polmonari evaporano, assorbendo calore latente dall'aria stessa, ormai a temperatura  $T_{a,OUT} \approx T_b$ . In formule, applicando ancora una volta il bilancio energetico:

$$(20) \quad \dot{Q}_{bre,LAT} = \rho_{H_2O} \dot{V}_{H_2O} r_{H_2O} = \dot{m}_a r_{H_2O} (x_{a,IN} - x_{a,OUT}) \quad [W]$$

in cui:

$\dot{m}_a = [kg/s]$ : portata massica dell'aria inspirata

$r_{H_2O} = [J/kg]$  è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua.

$x_{a,IN}$ : umidità assoluta dell'aria in entrata

$x_{a,OUT}$ : umidità assoluta dell'aria in uscita

Si ricorda che l'umidità assoluta è definita come rapporto tra la massa di vapore contenuto nell'aria umida e la massa di aria umida:  $x \triangleq \frac{m_v}{m_a} = \frac{p_v}{p_a}$ .

Nelle normative, le formulazioni che tengono già conto dei valori noti sono le seguenti, in cui tutti i parametri sono già stati definiti:

$$\frac{\dot{Q}_{bre,SENS}}{A_b} = 0.0014 \frac{\dot{Q}_{met}}{A_b} (34 - T_a) \quad [W/m^2]$$

$$\frac{\dot{Q}_{bre,LAT}}{A_b} = 1.72 \cdot 10^{-5} \frac{\dot{Q}_{met}}{A_b} (5867 - \varphi p_{VS,a}) \quad [W/m^2]$$

## 2.1.5 Indici di valutazione del comfort termoigrometrico

### 2.1.5.1 Predicted Mean Vote (PMV)

Il PMV è un indice di valutazione del comfort termoigrometrico sviluppato da P. O. Fanger e impiegato sin dalla prima edizione della norma ISO 7730. Serve a prevedere il voto di un largo gruppo di utenti che valutano il comfort termico indoor con una scala di 7 voti, da -3 a +3 in base alle proprie sensazioni. -3 si riferisce ad una sensazione di forte freddo; +3 di forte caldo. La norma sopra citata identifica come range ottimale di comfort l'intervallo  $[-0.5; +0.5]$ .

Il modello Fanger si basa sul concetto già esposto precedentemente di *omotermia*, per cui l'*energia interna* del corpo si deve mantenere costante nel tempo per permettere all'organismo di mantenere una temperatura pressoché costante.

Seguendo la notazione utilizzata finora, dall'equazione (5), scomponendo la potenza termica dissipata  $\dot{Q}_{diss}$  in tutte le potenze di scambio trattate nei precedenti paragrafi, tralasciando il termine di conduzione  $\dot{Q}_{cond}$  e dividendo per la superficie corporea  $A_b$ , si ottiene:

$$P = \frac{\dot{Q}_{met}}{A_b} - \frac{\dot{W}}{A_b} + \frac{\dot{Q}_{diss}}{A_b} =$$

$$= \frac{\dot{Q}_{met}}{A_b} - \frac{\dot{W}}{A_b} + \frac{\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{irr} + \dot{Q}_{diff} + \dot{Q}_{sw} + \dot{Q}_{bre,SENS} + \dot{Q}_{bre,LAT}}{A_b}$$

Il PMV è ottenuto dalla relazione tra l'equazione precedente e dall'analisi statistica di Fanger:

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

dove è stato definito  $M \triangleq \frac{\dot{Q}_{met}}{A_b}$ .

Mettendo insieme tutte le considerazioni già fatte, utilizzando formule empiriche e valori noti, la norma ISO 7730 propone il calcolo del PMV nella formula riportata nell'*Appendice A*. In questa istanza si sottolinea che tale indice dipende da 2 parametri fisiologici e 4 ambientali.

$$PMV = f(M, I_{cl}, T_a, T_{MR}, v_{ar}, \varphi)$$

### 2.1.5.2 Predicted Mean Vote semplificato (sPMV)

Il PMV ha varie limitazioni, prima tra tutte il fatto che è in funzione di ben sei fattori indipendenti, alcuni dei quali di difficile misura. Per superare questi limiti, nel 1971 Rholes ne sviluppò un modello semplificato che dipendesse da due soli parametri: la temperatura dell'aria e l'umidità relativa.

$$sPMV = a \cdot T_a + b \cdot p_{V,a} + c = a \cdot T_a + b \cdot \varphi \cdot p_{VS,a} + c$$

$T_a$  = [°C]: temperatura dell'aria

$p_{V,a}$  = [kPa]: pressione del vapore a temperatura dell'aria

$\varphi$ : umidità relativa

$p_{VS,a}$  = [kPa]: pressione del vapore saturo a temperatura dell'aria

$a, b, c$ : coefficienti di Rholes

Nel suo studio, Rholes calcolò i coefficienti  $a, b, c$  solo per un abbigliamento con resistenza termica pari a  $I_{cl} = 0.60 clo$ . Lo studio [15] ha esteso la validità di tale modello alle resistenze da  $0.25 clo$  a  $1.65 clo$ , rendendolo utilizzabile in più stagioni (Figura 3).

$I_{cl}$ (clo)	Sex	No. of surveys	$a$	$b$	$c$	% More reliable results	
						Rholes	New model
0.60	Male	-	0.220	0.233	5.673	-	-
	Female	-	0.272	0.248	7.245	-	-
	Both	-	0.245	0.248	6.475	-	-
0.25-0.50	Male	31	0.2630	0.3027	6.8066	23	77
	Female	80	0.2658	0.1072	6.7232	28	72
	Both	111	0.2803	0.1717	7.1383	37	63
0.51-1.00	Male	142	0.1162	-0.1338	2.2011	12	88
	Female	97	0.2424	0.0614	5.5869	10	90
	Both	239	0.1383	0.0269	3.0190	13	87
1.01-1.65	Male	70	0.1500	-0.1668	2.5121	4	96
	Female	43	0.1494	-0.1056	2.6408	0	100
	Both	113	0.1478	-0.1371	2.5239	0	100

Figura 3 - Coefficienti del modello aggiornato del PMV semplificato

Come si scriverà nel paragrafo relativo all'analisi dati, per valutare l'esperimento del presente lavoro di tesi si utilizza quest'ultimo modello aggiornato di PMV semplificato. In particolare, i coefficienti utilizzati sono quelli corrispondenti a  $I_{cl} = 0.25 \div 0.50 clo$ :

$$a = 0.2803, b = 0.1717, c = 7.1383.$$

## 2.2 Regolazioni del comfort termico

### 2.2.1 Termoregolazione

Come affrontato, il corpo umano tende a rimanere ad una temperatura ben precisa, compresa tra i 36.5°C e i 37.5°C. Lo fa adottando metodi *fisiologici* o *comportamentali* [12]. Quelli *fisiologici* sono controllati autonomamente dalla ghiandola dell'*ipotalamo*, per ostacolare o favorire lo scambio termico con l'ambiente. Nelle situazioni di caldo consistono in fenomeni come la sudorazione, la vasodilatazione, l'accelerazione della respirazione. In situazioni di freddo, invece, la vasocostrizione, la piloerezione (pelle d'oca), i brividi di freddo e la produzione di calore a partire dal Tessuto Adiposo Bruno (BAT) che permette di aumentare il metabolismo. Quelli volontari necessitano l'intervento attivo del soggetto e sono: il vestirsi con abbigliamento pesante, l'estensione posturale e la regolazione attiva dell'ambiente circostante accendendo sistemi HVAC o aprendo finestre e porte. Tutti questi metodi sono schematizzati in *Figura 4*, fornita dallo studio [12].

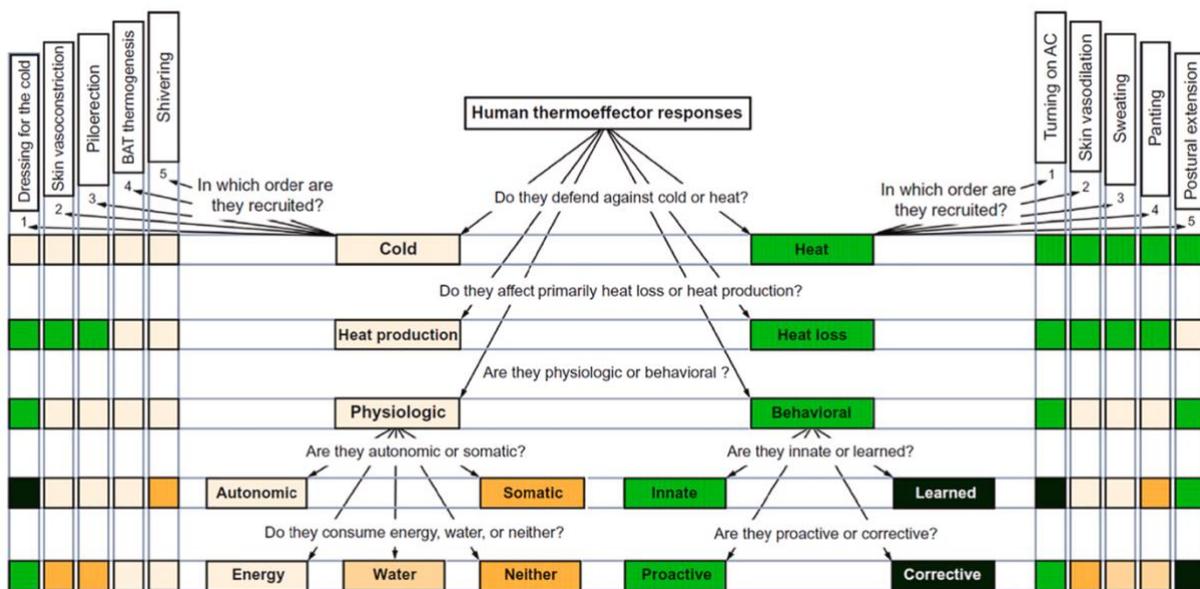


Figura 4 - Metodi di termoregolazione del corpo umano

Nell'esperimento di questo lavoro di tesi, ci si è concentrati sulla regolazione per *ventilazione naturale*, nonché sul consigliare all'utente quando e per quanto tempo aprire le finestre. La regolazione per ventilazione naturale, nella sua semplicità, riesce molto efficacemente a ristabilire le condizioni di comfort termico e qualità dell'aria. Come riporta lo studio [16], anche nei casi in cui, ad esempio, gli occupanti decidono volutamente di non aprire la finestra in quanto esternamente la temperatura è molto minore di quella della stanza (in particolare  $T_{outdoor} < 15^{\circ}C$ ) si è dimostrato che l'apertura delle finestre per un tempo limitato porta ad una sostanziale riduzione di concentrazione di  $CO_2$  senza influire significativamente

sull'efficienza energetica dell'impianto di riscaldamento. L'apertura delle finestre per la regolazione della temperatura è ottimale per periodi autunnali o primaverili; può essere efficace in determinate condizioni outdoor durante l'estate, mentre è limitata in inverno, con temperature esterne sotto i 16°C [16]. Un fattore importante da considerare è la stagionalità delle temperature, che cambia a seconda della geografia. Generalmente, se il discomfort rilevato è causato da una temperatura troppo alta, la ventilazione naturale nelle mezze stagioni è efficace se  $T_{outdoor} < T_{indoor}$  oppure, nel caso in cui  $T_{outdoor} > T_{indoor}$ , se la velocità del vento è abbastanza alta da favorire la dissipazione di calore per convezione (e a diminuire l'irraggiamento, andando ad abbassare la temperatura delle pareti), ma non troppo da risultare fastidiosa. In estate si rientra solitamente in quest'ultima casistica.

## 2.2.2 Influenza dei fattori ambientali sul comfort termico

I parametri ambientali che concorrono in modo indipendente alla determinazione del comfort termico sono quattro: temperatura dell'aria  $T_a$ , temperatura media radiante  $T_{MR}$ , velocità dell'aria  $v_{ar}$  e umidità relativa  $\varphi$ .

La *temperatura* dell'aria influisce maggiormente sullo scambio termico per convezione, sottoforma di differenza con la temperatura della pelle. Infatti, se le due temperature sono uguali, la velocità di scambio è nulla.

La *temperatura* media radiante  $T_{MR}$  influisce solo sull'irraggiamento, ma in questo caso la velocità di scambio termico varia in base alla differenza tra  $T_{MR}$  e la temperatura dell'abbigliamento elevate alla quarta potenza. La sua misura di  $T_{MR}$  non è immediata. Inoltre, l'irraggiamento è un fenomeno indipendente dal mezzo che lo veicola e non coinvolge l'intero volume di aria. Perciò, è possibile che si manifesti in maniera localizzata nei dintorni del soggetto senza essere misurato dagli appositi strumenti di misura.

La *velocità dell'aria* entra in gioco nella convezione e nell'evaporazione dell'acqua e del sudore. Maggiore è il ricambio d'aria e maggiore sarà la potenza termica prelevata. Ciò può anche andare a diminuire, per convezione, la temperatura delle pareti, che andranno ad irradiare meno potenza.

Infine, l'*umidità relativa* (RH) contribuisce in modo negativo alla dissipazione per evaporazione dell'acqua diffusa attraverso la pelle e per evaporazione dell'acqua delle pareti polmonari e delle mucose. Maggiore è l'umidità relativa e minore sarà il fenomeno dell'evaporazione, poiché si raggiungerà prima la saturazione dell'aria. Quindi una maggiore quantità di acqua rimarrà allo stato liquido e non verrà asportata dal corpo. In condizioni medie di umidità relativa, la sua variazione non inficia significativamente sulle sensazioni del soggetto. Un valore molto alto, invece, rallenta lo scambio di energia termica; il contrario vale per un valore molto basso [10].

# Capitolo 3: Stato dell'arte

## 3.1 Robot per la misura del comfort e la regolazione automatica

Negli ultimi anni, diversi studi hanno portato avanti esperimenti che coinvolgono robot sociali per perfezionare la stima di alcuni dei sei fattori che concorrono nella determinazione del PMV, indice usato per predire le sensazioni di comfort termico degli occupanti di un ambiente indoor, attraverso la misura dei parametri fisiologici, che dipendono dal soggetto in esame.

In [17] si usa il robot mobile *PeopleBot* (Figura 5), integrato con una fotocamera termica, una fotocamera RGB e tre termocoppie al fine di calcolare la resistenza termica dei vestiti degli utenti e, con questa, stimare il PMV per predire le loro sensazioni. Il calcolo della resistenza termica è basato, in questo caso, sul confronto tra la temperatura della pelle e quella dei vestiti. Si sono posti i partecipanti in ognuna delle tre camere climatiche per 20 minuti, a varie condizioni di temperatura. Le immagini e le temperature sono state misurate a tre diverse altezze del corpo. Al soggetto è stata richiesta la compilazione di questionari sul comfort termico. Si sono ottenuti dati che rivelano una differenza media tra il PMV così ottenuto e il voto soggettivo dalle persone di: -0,37 (altezza dei piedi), -0,93 (altezza del busto), -0,87 (altezza del viso), con rispettive deviazioni standard di: 1.91, 1.60, 1.25. Considerando che  $PMV \in [-3; 3]$  e che il range di comfort definito dalla norma ISO 7730 è  $[-0.5; 0.5]$ , tali valori denotano le differenze tra i dati oggettivi e le percezioni del soggetto, dovute a stime dei parametri del PMV spesso poco accurate.



Figura 5 - Robot PeopleBot

In [18] si sviluppa un sistema di *user-preference-learning* per controllare l'impianto di condizionamento dell'aria, che riesca a superare i limiti dovuti ad errori delle telecamere termiche ("vision errors"). Il sistema riconosce e quantifica l'attività metabolica del soggetto e

la resistenza termica dei vestiti tramite analisi RGB delle immagini acquisite con la camera installata nel robot. In base a questo e ai dati misurati da una rete di sensori di temperatura che comunicano con il robot via internet, il sistema regola l'impianto di condizionamento per migliorare il comfort termico nell'ambiente. L'utente ha poi la possibilità di esprimere un giudizio sulle azioni di regolazione attuate. In base ai feedback, il sistema applica algoritmi di apprendimento delle preferenze dell'utente, per migliorare gli interventi successivi. Il principale focus di tale studio è stato applicare aumentare l'accuratezza del riconoscimento tramite immagini RGB. A questo scopo, è stato usato un metodo di riconoscimento delle immagini basato su più frame successivi a quello analizzato (*window-based recognition*). Ciò ha permesso un incremento dell'accuratezza dell'8%. Infine, sono stati applicati vari metodi di miglioramento visivo delle immagini per minimizzare i cosiddetti "vision errors", riscontrati anche nello studio [17]. La maggiore accuratezza riscontrata è stata di 0.8607 con il metodo di miglioramento visivo "*FLH + sharpening*", a discapito di una latenza dell'output di 0.1789 s. Il sistema di miglioramento delle immagini ha consentito una riduzione dei feedback negativi del 20%.

In [19], un robot comandato con la scheda *VEX Cortex Microcontroller* (Figura 6) è impiegato per muoversi negli spazi di un campus universitario e rilevare le seguenti misure: temperatura, umidità relativa, CO<sub>2</sub>, CO, illuminazione, temperatura corporea, wearing-mask detection. A tali fini, è stato integrato con sensori fotoresistivi (LDR), termometri ad infrarossi, termistori e sensori di umidità relativa (DHT11), sensori di CO<sub>2</sub> e CO, fotocamera RGB. In base ai dati rilevati, il robot può attivare o disattivare vari sistemi di Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) tramite il confronto delle misure con dei range di comfort standardizzati. Può anche avvisare la direzione del campus in caso di individuo con alta temperatura corporea o che non indossa la mascherina in prevenzione del Covid19. Può anche attivare un sistema che disinfetta oggetti tramite una lampada a raggi UV. Il focus principale di questo studio è il riconoscimento visivo dell'uso di mascherine facciali filtranti. Sono state portate avanti 60 prove. L'accuratezza della "wearing-mask detection" è del 93.33%. Durante il suo percorso, il robot ha anche sanitzato una borsa tramite lampada UV. Si è posta meno attenzione, invece, al rilevamento del comfort termico.



Figura 6 - Robot e scheda VEX Cortex Microcontroller

## 3.2 Robot per la misura del comfort e l'interazione con l'utente

Solamente nello studio [8], del 2020, si usa il robot sociale *NAO* (Figura 7) per interagire con l'utente e dare suggerimenti per migliorare il comfort indoor in modo manuale.

Nello studio citato vengono misurati illuminazione, pressione sonora, temperatura dell'aria e umidità relativa da sensori esterni che il robot porta con sé (Figura 7) e che vengono ogni volta posizionati dal soggetto vicino a sé. Il robot, quindi, interagisce vocalmente con l'utente e formula delle domande per ottenere le sue preferenze soggettive. In base a tali preferenze e ai dati misurati, che vengono confrontati con soglie di comfort standardizzate, sviluppa dei suggerimenti personalizzati. Si possono verificare 4 situazioni: quella in cui sia secondo l'utente che secondo i dati oggettivi il comfort è verificato; quella in cui l'utente sente un malessere, mentre i dati non lo prevedono; quella opposta, in cui l'utente si ritiene soddisfatto, ma ciò è in contrasto con i dati; quella in cui entrambi concordano sulle condizioni di discomfort. Negli ultimi tre casi, il robot interviene con i suggerimenti.



Figura 7 - NAO Robot e strumenti di misura

I risultati dello studio non riguardano l'efficacia dei suggerimenti personalizzati, bensì sottolineano il gap tra dati oggettivi e percezione dell'utente. In particolare, per quanto riguarda il comfort termico, delle varie prove con ognuno dei 10 partecipanti non si è mai verificata la situazione in cui il voto soggettivo e i dati oggettivi fossero in accordo sulla presenza di un comfort ottimale. Nel 40% dei casi l'utente si riteneva soddisfatto mentre i dati rilevavano un discomfort termico. Per il 30% è avvenuta la situazione opposta di disaccordo e per il restante 30% dei casi l'utente e i dati erano in accordo sulla situazione di discomfort termico. Per quanto

riguarda il comfort visivo, nonché l'illuminazione, il 10% delle volte si è rilevato un accordo sulla situazione di comfort, il 60% l'occupante era soddisfatto e in disaccordo con i dati, il 10% la situazione opposta e il 20% un accordo sulla situazione di discomfort. Infine, il comfort sonoro ha portato risultati di totale accordo tra utente e dati, con l'80% dei casi di comfort e il 20% di discomfort.

Alcuni dei punti di forza dello studio [8] riguardano l'attitudine degli utenti i quali si dimostrano più inclini a seguire consigli e a interagire con un robot sociale, i suggerimenti sono personalizzati e l'interazione permette di aumentare la consapevolezza degli utenti. I limiti invece riguardano il fatto che la misura non è autonoma, in quanto l'utente deve posizionare i sensori e che l'interazione robot/utente è invasiva e occupa più di 10 minuti ad ogni ciclo; inoltre nello studio non si misura la qualità dell'aria.

Concludendo, gli studi citati paragrafo 3.1 usano un robot per monitorare alcuni parametri dell'IEQ ed intervenire automaticamente sulla regolazione tramite il sistema di condizionamento dell'aria. Il limite di questo approccio è che il sistema agisce senza tenere conto delle preferenze soggettive dell'utente. Inoltre, non si rende l'occupante consapevole della condizione in cui si trova, né delle regolazioni attuate. Lo studio riportato in questo paragrafo, invece, colma tali problematiche utilizzando un metodo che prevede l'interazione diretta tra robot e utente, e la formulazione di suggerimenti personalizzati. Questa metodologia risulta però invadente nei confronti dell'occupante e non monitora la qualità dell'aria.

In questo lavoro si utilizza un metodo ispirato allo studio [8], rendendolo più fruibile, meno invasivo e misurando anche la qualità dell'aria, nonché la concentrazione di CO<sub>2</sub>.

# Capitolo 4: Materiali e metodi

## 4.1 Descrizione dell'esperimento

L'esperimento prevede l'installazione di 3 basi di sensori ognuna in una stanza. I dati indoor misurati vengono condivisi tramite Wi-Fi al server Python, che li elabora e li confronta con i range di comfort standardizzati. Se il programma riconosce un discomfort in una (o in più) delle 3 stanze e al contempo valuta che è possibile aprire le finestre in base ai dati outdoor, allora attiva il robot, come riportato in *Figura 8*. Il robot si reca in ogni stanza, e informa l'utente sulla situazione rilevata e sulle soglie teoriche di comfort e dà il suggerimento di aprire la finestra per quindici minuti. Starà infine all'utente valutare se seguire il consiglio in base alle proprie sensazioni. Questi può altrimenti decidere di non aprire la finestra, oppure di aprirla per un tempo diverso da quello consigliato.



*Figura 8 - Il ciclo dell'esperimento.*

## 4.2 Set-up di misura

### 4.2.1 Robot sociale: Misty II

Misty II (*Figura 9*) è un robot sociale disponibile in commercio e prodotto dalla Misty Robotics. Dall'altezza di 35.56 cm, è dotato dei numerosi sensori riportati nella *Tabella 2*, con le relative funzioni.

Misty II ha a bordo 2 altoparlanti HI-FI, uno schermo LCD da 4.3'', un led RGB. È comandato dai processori Windows IoT Core e Android 8.1. Può essere integrato con una scheda Arduino Pro apposita. Ha 6 gradi di libertà: 1 per spostarsi avanti o dietro, 1 per ruotare nel piano, 1 per ruotare le braccia, 3 per muovere la testa nello spazio.

Il robot è originariamente stato pensato per essere programmato in JavaScript. Tuttavia, gli sviluppatori hanno reso possibile la programmazione attraverso linguaggi come Blockly, che

lo rende utilizzabile ad ogni età, e Python, grazie alle librerie dedicate che, tramite API (Application Programming Interface) comunicano con i motori e con i sensori.

I sensori utili ai fini dell'esperimento sono l'*Unità di Misura Inerziale (IMU)* e gli encoder. Entrambi si resettano ogni volta che Misty II viene avviato. Il primo consta di un *giroscopio* e un *accelerometro*, e serve per misurare l'orientamento e l'accelerazione del robot nelle 3 direzioni spaziali: *beccheggio*, *rollio* e *imbardata*. Gli *encoders*, invece, servono per misurare e regolare la velocità angolare e la posizione degli assi dei motori che muovono le ruote, le braccia e la testa. L'IMU ha risoluzione di 1° per quanto riguarda l'orientamento nei tre assi, 0.1°/s per la velocità misurata dal giroscopio e 4 mgf (milligrammi-forza) per la forza misurata dall'accelerometro.

Tipo di sensore	Numero di sensori	Funzione	Specifiche tecniche
Fotocamera RGB	1	Riconoscimento visivo di oggetti e persone; fotografie e video; interazione con l'ambiente	13 MP, Sony IMX 214
Microfono	3	Riconoscimento vocale, registrazione audio e interazione con gli utenti	Mono, 16-bit, 16 kHz
Tempo di volo	8	Misura della distanza per evitare ostacoli	Risoluzione: 1mm Soglia: 10 mm Fondo scala: 1200 mm (ai lati); 150 mm (sotto)
Tocco capacitivo	6	Rilevamento del tocco umano per interazioni tattili	Segnale binario (on/off)
Unità di Misura Inerziale (IMU)* ed encoder	1*	Rilevamento di velocità, accelerazione e orientamento del robot nello spazio per il controllo dei motori	**
Urto	6	Rilevamento di collisioni per evitare danni e migliorare la navigazione.	Segnale binario (on/off)

Tabella 2 - Sensori presenti in Misty II

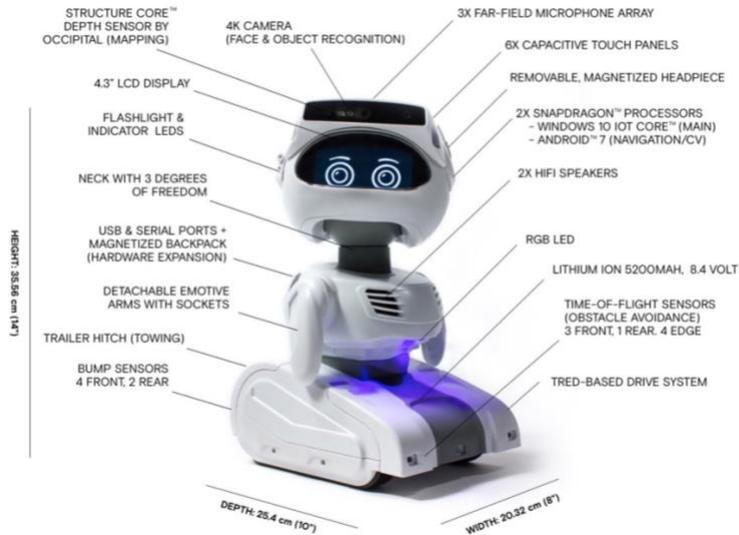


Figura 9 - Sensori presenti in Misty II

## 4.2.2 Stazione di sensori: Netatmo

Per la misura delle grandezze che determinano l'IEQ si è optato per la stazione di sensori Netatmo, in particolare il suo modulo indoor (Figura 10). In Tabella 3 vengono riportati il range e l'accuratezza di ogni sensore che si è usato per l'esperimento. Il tipo di sensori non è riportata nelle specifiche tecniche fornite dalla casa madre.

Sensore	Range	Accuratezza
Temperatura	[0; 50] °C	± 0.3°C
Umidità relativa	[0; 100] %	± 3%
CO <sub>2</sub>	[0; 5000] ppm	ND
Suono	[35; 120] dB	ND

Tabella 3 - Sensori nelle basi Netatmo

I dati rilevati dalla stazione sono facilmente accessibili in tempo reale e da remoto tramite una smartphone app dedicata. Inoltre, Netatmo mette a disposizione degli sviluppatori una API apposita per scambiare i dati in formato *json*, forniti dalle stazioni di misura via WI-FI.

Il periodo di campionamento è di 5 minuti, sebbene l'API Netatmo permetta agli sviluppatori di raccogliere i dati come minimo ogni 30 minuti. Un ulteriore vincolo riscontrato dopo l'ultimo aggiornamento è la necessità di rigenerare il token ogni 3 ore manualmente, per

effettuare la richiesta HTTP all'API. Ciò rappresenta un limite all'automatizzazione del programma.



Figura 10 - Netatmo, modulo di sensori indoor

### 4.2.3 Python: librerie e funzioni utilizzate

Per raccogliere e processare i dati, controllare il robot e azionare le funzioni di interazione, si è usata la programmazione in Python.

Misty II presenta la possibilità di essere comandato tramite questo linguaggio, grazie all'installazione, nell'ambiente Anaconda, della libreria *mistyPy* e dell'importazione delle sue classi, tra cui le principali sono: *Robot* e *Events*. Queste permettono di fare richieste tramite gli *endpoint* dell'API e scambiare dati con i sensori del robot in tempo reale.

La classe *.RobotGenerator* permette la connessione tra l'IDE e il Misty II.

La classe *.Robot* si occupa del controllo dei motori grazie ai dati forniti dai sensori inerziali IMU, e, tra le altre cose, del controllo degli speaker. È stata quindi utile, insieme alla precedente, ai fini dell'esperimento.

La classe *.Events*, invece, si occupa ad esempio dell'accesso ai dati delle fotocamere, al riconoscimento facciale, all'accesso ai microfoni e ai sensori capacitivi. Per l'esperimento non è stata utilizzata.

Le funzioni della classe *Robot* che sono state utili sono:

- *.drive\_heading(heading,distance,timeMs,reverse)*, che permette di comandare il movimento del robot lungo una linea dritta per il tempo indicato
- *.drive\_arc(heading,radius,timeMs,reverse)*, che permette di guidarlo lungo un arco di circonferenza di raggio indicato, per il tempo impostato

- `.speak(text, volume, speed, language)`, che permette riprodurre un testo vocale, in una determinata lingua

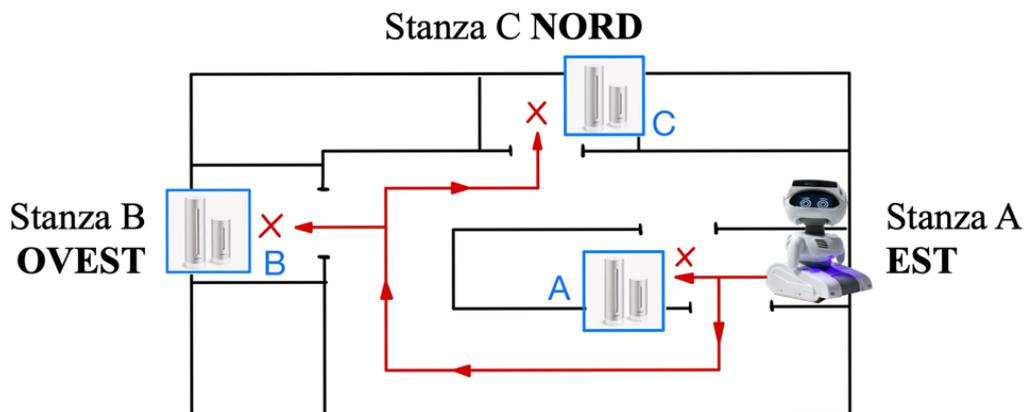
Per ottenere i dati indoor e outdoor sono state usate le librerie `requests` e `json`. Per gestire ed elaborare i dati, `pandas`. Per graficarli, `matplotlib`.

## 4.3 Protocollo sperimentale

L'esperimento ha avuto luogo presso il piano a quota 185 m s.l.m. della facoltà di ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, nella città di Ancona. Si è svolto per quattro giornate lavorative consecutive, dall'11 al 14 giugno 2024, dalle 9:00 alle 17:00. La planimetria schematizzata del piano e il percorso, rappresentato dalle frecce rosse, che il robot svolge per raggiungere i tre ambienti sono rappresentati in *Figura 11*.

I tre spazi lavorativi coinvolti sono mediamente in condizioni omogenee. È bene riportare le direzioni verso cui si affacciano le relative finestre: ambiente A, Est; ambiente B, Ovest; ambiente C, Nord. Le camere B e C sono uffici personali; la A è un'area comune di lavoro.

Nel periodo in cui si è svolto l'esperimento, l'impianto di condizionamento dell'aria si è avviato automaticamente solo l'ultimo giorno. In *Figura 12* si riportano le logiche software utilizzate per gestire l'esperimento, descritte con più dettaglio nei paragrafi a seguire.



*Figura 11 - Mappa del percorso di Misty II*

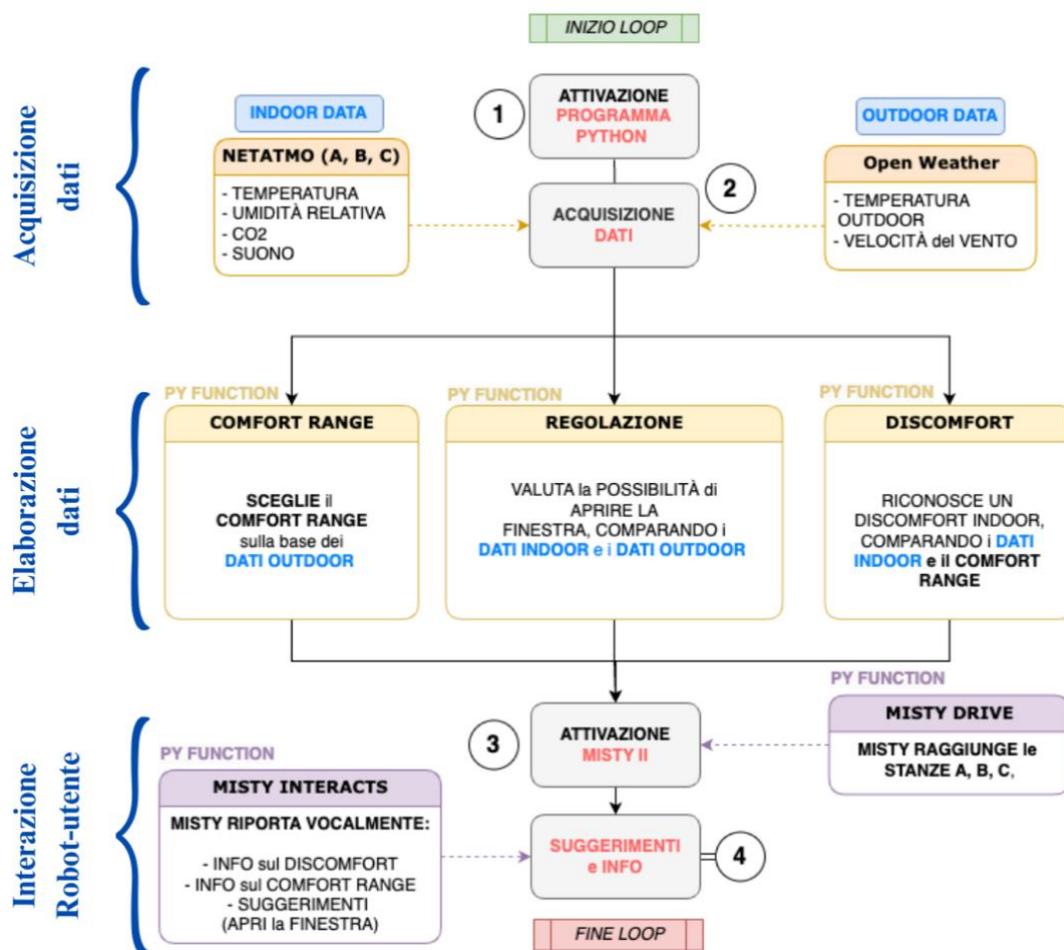


Figura 12 - Schema del protocollo dell'esperimento

### Fase 0: Preparazione

Le tre stazioni di sensori indoor Netatmo sono posizionate ognuna in uno dei tre ambienti lavorativi, sopra le scrivanie, in modo da essere prossime all'utente.

Ad inizio giornata, il robot è posizionato nella sua base, all'interno dell'ambiente A, sempre nella stessa posizione e con lo stesso orientamento. Affinché raggiunga correttamente le stanze, è molto importante posizionarlo parallelamente alle pareti e nel punto preciso in base al quale sono state prese le misure delle distanze usate nel programma. Dopodiché il robot viene acceso; è in questo momento che l'Unità di Misura Inerziale (IMU) prende i riferimenti dei tre assi spaziali. Quindi viene collegato Misty II al programma Python che girerà su un computer esterno e lo si avvia manualmente.

## ***Fase 1: Avvio del programma***

Il programma Python si attiva automaticamente ogni 30 minuti, in particolare ad ogni inizio d'ora e ad ogni mezz'ora, ad eccezione del primo avviamento.

## ***Fase 2: Acquisizione dati***

Il programma richiede, tramite una HTTP request all'API Netatmo, i dati delle tre stazioni di sensori indoor ( $T_a$ ,  $RH$ ,  $Noise$ ,  $CO_2$ ).

Il programma richiede tramite un'altra HTTP request all'API di *OpenWeather* i dati meteorologici attuali ( $T_{ext}$ ,  $RH_{ext}$ ,  $w_{ext}$ ) relativi al centro della città di Ancona.

Vengono aggiornati i 3 Data Frames con i dati raccolti, ognuno per una stazione.

## ***Fase 3: Processamento dati***

Questa fase è composta da tre principali funzioni che permettono di decidere quando attivare il robot.

### *Funzione Comfort Range*

Tale funzione permette di scegliere, in base ai dati meteorologici, se usare le soglie di comfort invernali (Winter Comfort Range) o quelle estive (Summer Comfort Range), che sono riportate nella *Tabella 4* e che differiscono solo per le soglie di temperatura dell'aria. Tali intervalli sono stati scelti sulla base degli studi [19], [8] e della norma ISO 7730.

	Summer Comfort Range		Winter Comfort Range	
	Min	Max	Min	Max
<b>Temperatura dell'aria</b>	23°C	26.5°C	20°C	25.5°C
<b>Umidità relativa</b>	40%	60%	40%	60%
<b>Concentrazione di CO2</b>	-	750 ppm	-	750 ppm
<b>Livello sonoro</b>	-	55 dB	-	55 dB

*Tabella 4 - Soglie di comfort indoor*

### Funzione di Regolazione

Questa seconda funzione permette di valutare se esternamente all'edificio sono presenti le giuste condizioni per poter effettuare una regolazione dell'IEQ, aprendo le finestre. Sfrutta il

confronto tra dati indoor e outdoor. Per esempio, dà un output negativo (valore booleano uguale a *False*) se fuori fa troppo freddo o troppo caldo, o se c'è troppo vento o troppo poco.

### Funzione di Riconoscimento Discomfort

Quest'ultima funzione confronta i dati indoor dell'ultima misura con le soglie di comfort definite dalla *Funzione Comfort Range*. È costituita da un *Dict* (dizionario Python) in cui ad ogni tipo di discomfort è associato un valore booleano, *True* o *False*.

I tipi di discomfort possono essere:

- $d_{T1}$ : temperatura T troppo elevata
- $d_{T0}$ : temperatura T troppo bassa
- $d_{RH0}$ : umidità relativa RH troppo elevata
- $d_{RH1}$ : umidità relativa RH troppo bassa
- $d_N$ : Noise troppo elevato
- $d_{CO2}$ : concentrazione di CO2 troppo elevata

### ***Fase 3: Attivazione robot***

Se la *Funzione di Riconoscimento Discomfort* riconosce almeno un discomfort il robot attiva la funzione "*Misty Drive*". Questa funzione è una successione di comandi che permette al robot di raggiungere la stanza in cui è stato rilevato il discomfort, o eventualmente più stanze. Il robot parte sempre dalla sua base, situata nella camera A, e se necessario raggiunge B. Da qui, dopo l'interazione, o torna alla base, oppure raggiunge C per infine tornare alla base.

### ***Fase 4: Interazione con l'utente***

Una volta che il robot ha raggiunto una stanza, si ferma e interagisce vocalmente con l'utente, tramite la *funzione di Interazione (Figura 13)*. Il dialogo è in lingua italiana e varia a seconda dei dati e dei discomfort rilevati. È sempre presente una parte in cui informa l'utente dei dati che causano il discomfort. Questa parte è preceduta da una in cui suggerisce di aprire la finestra, se la *Funzione di Regolazione* ha dato un output positivo. Quello che segue è un esempio che replica ciò che il robot dice nel caso in cui nell'ambiente sia stata misurata una temperatura troppo alta rispetto alla soglia di comfort estiva e fuori la temperatura sia leggermente minore.

*"Ehi, scusa il disturbo!*

*Ti consiglio di aprire la finestra per quindici minuti circa!*

*Fuori è più fresco e non c'è troppo vento. (\*)*

*La temperatura è troppo alta! Sono  $\{T_{indoor}\}$  gradi.  
Dovrebbero essere tra i  $\{Comfort\ range[T_{MIN}]\}$  e i  $\{Comfort\ range[T_{MAX}]\}$  gradi  
La concentrazione di CO<sub>2</sub> è troppo alta, a  $\{Livello\ CO_2\}$  ppm!  
Il livello di CO<sub>2</sub> dovrebbe essere inferiore a  $\{Comfort\ range[CO_{2MAX}]\}$  ppm ”*

L'alternativa alla frase contrassegnata con (\*) è:  
*Il leggero vento raffrescherà l'ambiente, anche se fuori è più caldo*



*Figura 13 - Foto di Misty II durante un'interazione*

## 4.4 Moduli software per la misura dell'IEQ

In questa parte si analizza dettagliatamente ogni aspetto della progettazione del programma, dalle relazioni che caratterizzano ogni funzione sottolineando anche eventuali limitazioni riscontrate durante la messa in pratica dell'idea dell'esperimento.

### 4.4.1 Trigger del programma

L'azionamento del programma avviene ad ogni inizio dell'ora e ad ogni mezz'ora, per non generare stress nei confronti dell'occupante. A livello di codice, per far avviare il ciclo negli istanti desiderati si è usato un *while loop* e un *if statement* che verifica che l'istante attuale sia un multiplo di 1800 secondi. L'istante attuale è espresso in formato *Unix*, ovvero con il numero di secondi passati dall'*Epoch*, 00:00:00 Coordinated Universal Time (UTC) del 1° gennaio 1970. Si riporta un esempio di codice nell'*Appendice B*.

### 4.4.2 Acquisizione dati

Il dataset utilizzato nell'esperimento comprende i dati misurati dalle tre stazioni Netatmo (T, CO<sub>2</sub>, Noise, RH, i dati outdoor, che vengono usati nelle funzioni di *Comfort Range* e di *Regolazione*.

I dati outdoor e indoor vengono ottenuti da una API tramite una HTTP request con metodo GET. Di seguito i relativi *endpoint* e le API CALL:

Dati	Endpoint	API CALL
Indoor	<i>api.netatmo.com</i>	<i>api.netatmo.com/api/getmeasure</i>
Outdoor	<i>api.openweathermap.org</i>	<i>api.openweathermap.org/data/2.5/weather?q=Ancona,it&amp;appid={api_key}</i>

Tabella 5 - HTTP request per i dati indoor e outdoor

Le stazioni Netatmo sono posizionate ognuna in uno dei tre ambienti in esame, posizionati sulla scrivania della postazione di lavoro dell'utente. Ciò implica una maggiore frequenza di misura, rispetto al caso in cui il robot porti solidali con sé gli strumenti di misura, usato ad esempio dallo studio [8]. Una limitazione riscontrata nella richiesta dei dati indoor è stato l'ottenimento del token necessario a tale scopo. Dopo l'ultimo aggiornamento, lo si deve generare manualmente ogni tre ore. Inoltre, Netatmo impone il vincolo di tempo minimo tra una richiesta e l'altra pari a 30 minuti. Ciò può rivelarsi limitante se la variazione delle grandezze misurate nel tempo è alta, dato che in tale situazione si può verificare un elevato discomfort prima che il robot intervenga. D'altra parte, la temperatura dell'aria è una grandezza che in gran parte dei casi varia lentamente nel tempo. Diverso è il caso in cui c'è una potente fonte di calore localizzata come nel caso in cui alcune zone della stanza vengono all'improvviso irradiate dal sole. I dati sono forniti in formato *json* e successivamente trasformati in un Data Frame in *pandas*. Il vincolo relativo ai dati outdoor, invece, è che la stazione di misura usata da Open Weather è nel centro città; quindi, lontano dall'edificio in cui ha preso luogo l'esperimento. Sarebbe ideale ricevere dati prossimi alle zone d'interesse, ovvero le finestre di ogni stanza.

#### 4.4.3 Selezione del range di comfort

Gli intervalli di comfort sono soglie, definite standard come ASHRAE 55, ASHRAE 62 e ISO 7730, oltre cui è probabile che il soggetto non si senta a suo agio. Permettono di stabilire il comfort tenendo in considerazione solo la temperatura e l'umidità relativa e di non ricorrere al completo calcolo del PMV o di altri indici.

Per determinare le soglie di temperatura dell'aria e di umidità relativa, si sono consultati gli studi [19] e [8]. Per stabilire la soglia di concentrazione di  $CO_2$ , si è rimasti più conservativi rispetto agli standards ASHRAE 62, secondo cui con una concentrazione di 1000-1200 ppm la sostanziale maggioranza degli occupanti è tipicamente soddisfatta. Si è considerato invece il dato di 750 ppm, riportato dallo studio [20], che sottolinea l'influenza della  $CO_2$  sulla

diffusione di virus infettivi, quali il Covid19. I valori scelti sono quelli riportati nella *Tabella 4*.

Il problema affrontato a questo punto è stato stabilire se usare i valori di comfort invernali o quelli estivi nei periodi di mezza stagione, in cui le temperature sono spesso variabili di giorno in giorno. Allora, contando che in genere ci si veste in base alle condizioni esterne, si è scelto di considerare la temperatura esterna e confrontarla direttamente con le temperature limite di comfort. In particolare, se la temperatura outdoor è minore di 1°C rispetto al limite inferiore estivo, allora il programma considera come valori di comfort quelli invernali.

Ciò si è tradotto nel creare due tabelle distinte, una per i valori di comfort estivi (SCR: Summer Comfort Range) e l'altra per quelli invernali (WCR: Winter Comfort Range) e nell'eguagliare il Data Frame di riferimento (CR: Comfort Range) ad una delle due in base alle condizioni esterne, nonché in base alla seguente relazione:

$$\text{se } T_{outdoor} \leq (T_{MIN,SCR} - 1) = 22^{\circ}C \rightarrow CR = WCR$$

#### 4.4.4 Modulo di *Regolazione*

La regolazione dell'ambiente presa in esame è la ventilazione naturale, ottenuta con l'apertura delle finestre. È un tipo di regolazione semplice, ma molto spesso efficace [16]. Questo metodo è sicuramente limitato nelle condizioni invernali e quelle estive in cui la temperatura è maggiore di quella di comfort – quindi aprire la finestra non aiuterebbe a ridurre la temperatura indoor – e la velocità dell'aria è molto bassa (quindi non si otterrebbe un raffrescamento per convezione). C'è invece da tener conto che nella situazione in cui la velocità dell'aria estiva sia abbastanza elevata, ma non troppo da risultare fastidiosa (si è considerato accettabile il seguente range:  $0.2 \text{ m/s} < v_{vento} < 7 \text{ m/s}$ ), la potenza termica dissipata per convezione aumenta, quindi ci si raffresca e il comfort percepito è maggiore. Ovviamente con tali valori limite ci si sta riferendo alla velocità del vento, non dell'aria nell'ambiente indoor, la quale deve essere minore affinché sia accettabile. Solitamente gli standard considerano la soglia di accettabilità non superiore a  $v_a = 0.4 \text{ m/s}$ . Aprendo la finestra, si potrebbero raggiungere velocità maggiori - ma temporanee - se ad esempio si generano correnti interne nell'edificio. In tal caso sarà a discrezione dell'utente mantenere aperte le finestre per minor tempo.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, il vincolo è che l'ambiente outdoor abbia una condizione migliore di quello indoor e che non ci sia troppo vento fuori:  $v_{vento} < 7 \text{ m/s}$ .

Nel caso di concentrazione di  $CO_2$  troppo elevata, invece, non si sono considerati limiti esterni per la ventilazione naturale, in quanto generalmente sempre efficace, anche per pochi istanti [16].

Nel programma, tutto ciò si è tradotto nel creare una variabile booleana per ogni base, il cui valore è preimpostato come “*False*” e viene aggiornato come “*True*” se almeno una delle condizioni esterne appena discusse lo permettono. Concettualmente:

- se  $T_{indoor}$  è troppo alta e  $T_{outdoor} < T_{indoor}$  oppure  $v_a \in [0.2; 7]$  m/s
- se  $T_{indoor}$  è troppo bassa e  $T_{outdoor} > T_{indoor}$  e  $v_a < 7$  m/s
- se  $CO_2$  è troppo alta \*\*\*
- l'umidità relativa indoor è fuori range, mentre quella outdoor è ottimale

Se è verificata anche una sola tra queste condizioni, l'output della *funzione di Regolazione* sarà uguale a *True*.

#### 4.4.5 Modulo per il Riconoscimento Discomfort

Per stabilire se nei tre ambienti sono presenti, ad ogni attivazione del ciclo, delle condizioni di discomfort, si è creato per ogni stazione un Dict (dizionario Python) con 2 elementi per ogni riga: la variabile booleana che indica la presenza del relativo discomfort; il valore misurato della grandezza in questione. I valori booleani vengono poi modificati in base alle misure delle stazioni, per segnalare il discomfort: in tal caso passano da “*False*” a “*True*”. Il codice è consultabile nell'*Appendice D*.

#### 4.4.6 Modulo per pilotare Misty II

Le funzioni che il robot svolge sono principalmente due: percorrere la traccia prestabilita per raggiungere le varie stanze e tornare alla base, e interagire vocalmente con l'utente.

Una volta scelti, nello stesso piano, gli ambienti indoor in cui far avvenire l'esperimento, si sono prese le misure del percorso e lo si è programmato in Python utilizzando, dal modulo *mistyPy.Robot*, le funzioni “.*drive\_heading()*” e “.*drive\_arc()*”. Se deve intervenire sia nella stazione A, sia in B, sia in C, il robot raggiunge prima una, poi l'altra, poi l'altra ancora, seguendo sempre questo ordine. Essendo le stazioni B e C quelle più lontane dalla base di partenza, se deve agire in entrambe, il robot va prima in B e poi subito in C, senza tornare alla base. , Nell'*Appendice E* è riportato un esempio di codice per tornare dalla base C.

Un problema riscontrato nella fase di test è stato che a volte il robot esegue i comandi in modo impreciso, ad esempio percorrendo una distanza minore o maggiore di quella selezionata o virando di un angolo maggiore. L'unica causa rilevata e in seguito corretta è stata quella di lasciare troppo poco tempo tra un'azione e l'altra, tramite il comando “.*time.sleep(s)*”. In questo

caso il robot sovrappone due comandi e, non sapendo quale eseguire, si blocca. Per il resto, una causa non migliorabile e molto plausibile potrebbe derivare da errori di comunicazione tra il programma Python e il robot, per mezzo delle librerie apposite e della classe *.GenerateRobot* che li collega usando l'IP-address della rete a cui entrambi sono collegati.

#### 4.4.7 Modulo di interazione con l'utente

Questa funzione è la più articolata a livello di codice, poiché le frasi che il robot deve esprimere vocalmente variano a seconda delle misure e dei discomfort. Nell'*Appendice F*, un esempio relativo all'interazione nella stanza A.

## 4.5 Analisi dati

I dati che hanno permesso di valutare e quantificare la riuscita dell'esperimento sono le misure di temperatura dell'aria, umidità relativa, concentrazione di CO<sub>2</sub> e livello sonoro, durante le ore dei quattro giorni in cui si è svolto. Si sono segnati, inoltre, gli istanti in cui il robot è intervenuto e, tra questi, anche quelli in cui l'utente ha seguito i consigli, aprendo la finestra.

Dai dati grezzi delle tre basi di sensori indoor, si sono innanzitutto tenuti quelli relativi agli orari di interesse. Si sono poi aggiunte le colonne composte dalla codifica binaria "0" e "1" per indicare a quali orari il robot si è attivato e altre per indicare a quali orari le finestre nei relativi ambienti sono state effettivamente aperte. Ad ogni "1" corrisponde l'attivazione del robot e l'apertura della finestra nella relativa stanza. Per ogni "0", invece, il robot non è intervenuto o l'utente ha optato per non aprire la finestra.

Poiché il principale fattore di discomfort è stato quello termico, a partire dai valori della temperatura e dell'umidità relativa si è calcolato il PMV con il metodo semplificato di Rholes e migliorato da Buratti [15]. Il modello prevede, come già trattato nel paragrafo 2.1.5.2 Predicted Mean Vote semplificato (sPMV):

$$sPMV = a \cdot T_a + b \cdot \varphi \cdot p_{VS,a} + c$$

I coefficienti utilizzati in automatico dal programma Python in base alla stagione sono quelli corrispondenti a  $I_{cl} = 0.25 \div 0.50$  clo:  $a = 0.2803$ ,  $b = 0.1717$ ,  $c = 7.1383$ .

Per finire, si sono definiti e calcolati delle metriche per valutare le performance dell'esperimento, riportati in *Tabella 6*.

Nome indice	Formula	Significato
<b>Suggestion compliance</b>	$\frac{N. \text{ window openings}}{N. \text{ activations}} \cdot 100$	Indica la percentuale, sul numero totale di attivazioni e suggerimenti del robot, in cui l'utente ha seguito in consiglio di aprire la finestra
<b>Success rate</b>	$\frac{N. \text{ successes}}{N. \text{ window openings}} \cdot 100$	Indica la percentuale, sulle volte in cui è stata aperta la finestra, in cui tale regolazione ha portato ad un miglioramento dell'sPMV nei 30 minuti successivi (valutato come "successo") *
<b>sPMV increment</b>	$\left[ \frac{sPMV_i}{sPMV_{i-1}} - 1 \right] \cdot 100$	Valuta l'incremento percentuale dell'sPMV rispetto al valore della misura precedente all' <i>i</i> -esima apertura di finestra
<b>Average sPMV increment</b>	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (sPMV \text{ increment})_i$	Calcola la media dell' sPMV increment
<b>Comfort rate</b>	-	Calcola la percentuale, sul numero totale di misure durante l'esperimento, in cui l'sPMV si è mantenuto all'interno del range di comfort individuato dalla norma ISO 7730 ( $sPMV \in [-0.5; 0.5]$ )

Tabella 6 - Definizione degli indici per la valutazione dell'esperimento

\*Per miglioramento dell'sPMV nei 30 minuti successivi si intende una sua diminuzione se in partenza  $sPMV > 0$ , e un aumento se  $sPMV < 0$ .

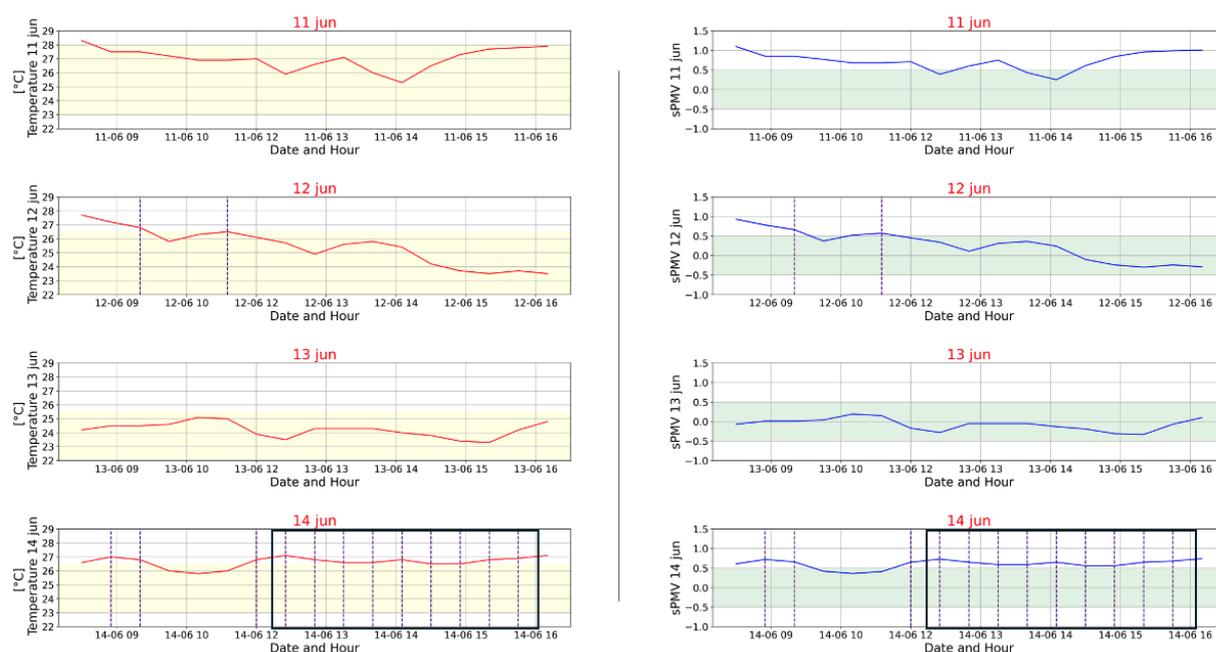
# Capitolo 5: Risultati

Di seguito i grafici della temperatura e dell'sPMV rispettivamente nella stanza A, B e C e relative considerazioni.

Le linee verticali rappresentano i momenti di attivazione del robot. I riquadri in nero evidenziano le volte in cui il robot si è attivato, ma è stato deciso di non seguire il suggerimento di aprire la finestra. Le aree verdi rappresentano il range di comfort per il PMV, individuato dalla norma ISO 7730.

Le aree gialle rappresentano il range di comfort per la temperatura. Si noti che, a causa di un errore di valutazione, durante il primo giorno è stato considerato come soglia massima di comfort estiva 28°C. Negli altri giorni, invece, la si è cambiata a 26.5°C. Ciò non va ad influire sugli indici di valutazione dell'esperimento, ad eccezione del *Comfort Rate*. Tuttavia, ciò ha diminuito il numero di attivazioni del robot durante il primo giorno nelle tre basi, riducendo il numero di dati utili. Inoltre, è bene notare come nel terzo giorno il sistema abbia considerato il Range di Comfort Invernale, con soglia massima di temperatura a 25.5°C, in quanto le temperature outdoor erano particolarmente basse rispetto agli altri giorni.

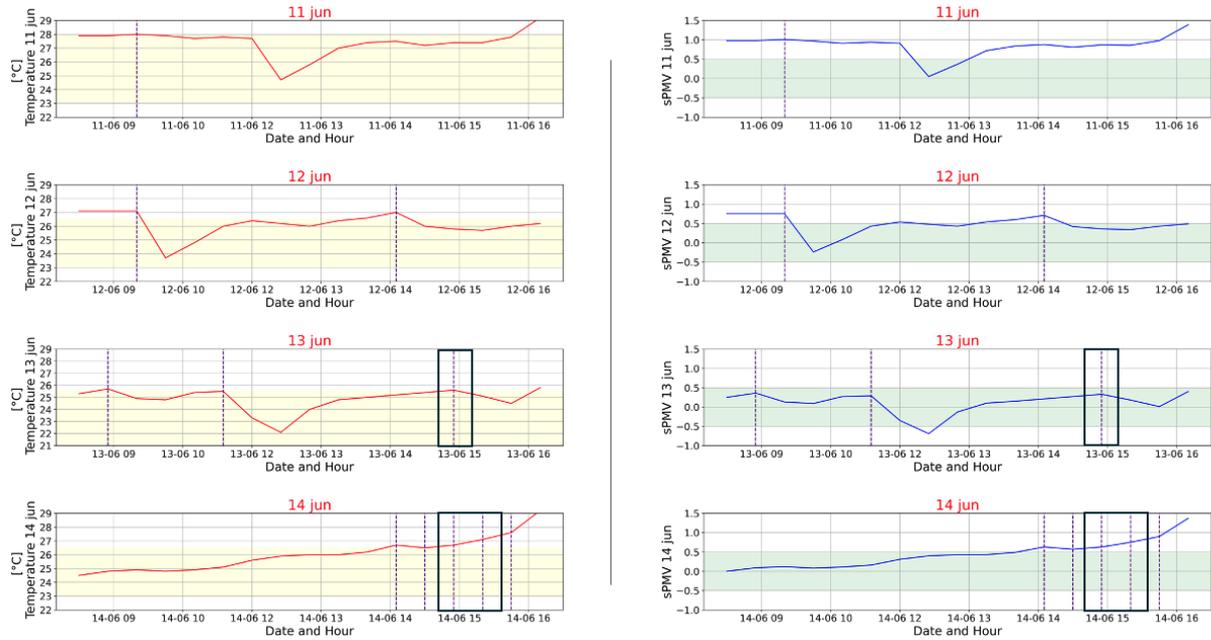
Figura 14 - Stanza A: Temperatura e sPMV nei quattro giorni



Dalla Figura 14, si noti come nel quarto giorno nella maggior parte delle attivazioni, si è valutato di non aprire la finestra. Ciò è dovuto dal fatto che è stato un giorno particolarmente caldo, in cui  $T_{outdoor} > 26.5^{\circ}C$ . Ciononostante, il sistema ha rilevato la possibilità di un miglioramento dell'IEQ, misurando un leggero vento esterno, e ha attivato il robot e i

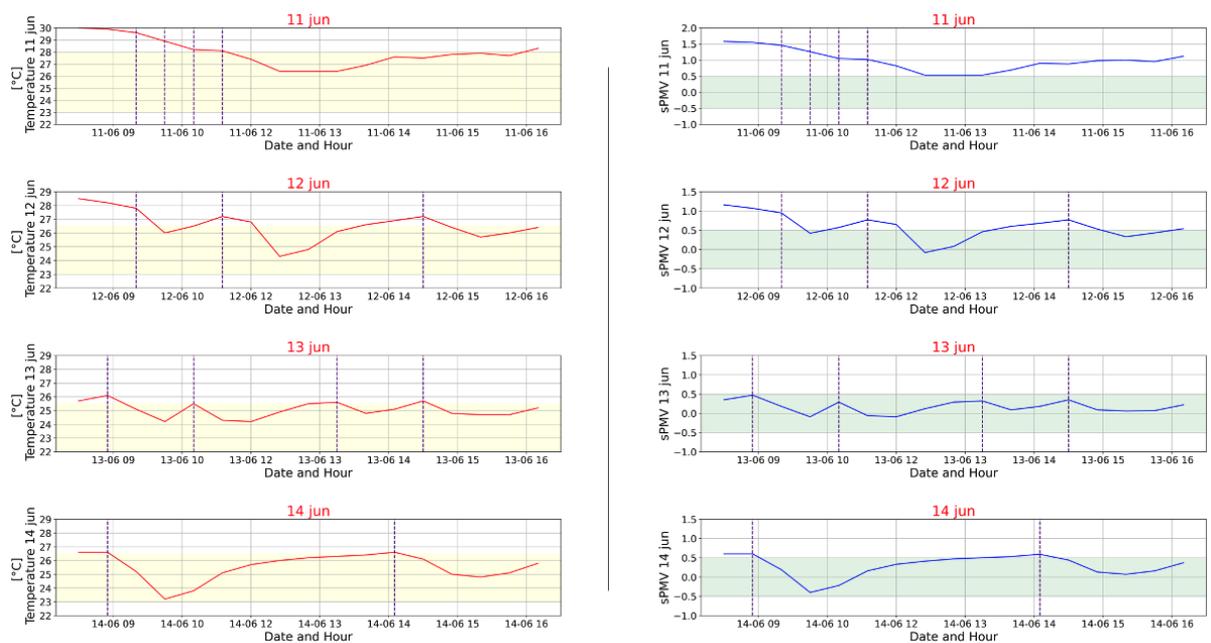
suggerimenti. L'utente ha comunque mantenuto chiusa la finestra a causa del diretto irraggiamento solare durante le ore di punta. Si consideri infatti che la finestra della stanza C è rivolta verso Est.

Figura 15 - Stanza B: Temperatura e sPMV nei quattro giorni



In B (Figura 15) si è verificata una situazione simile ad A per due volte durante il pomeriggio del quarto giorno. Inoltre, una volta durante il terzo giorno non si è aperta la finestra a causa di folate di vento troppo forti.

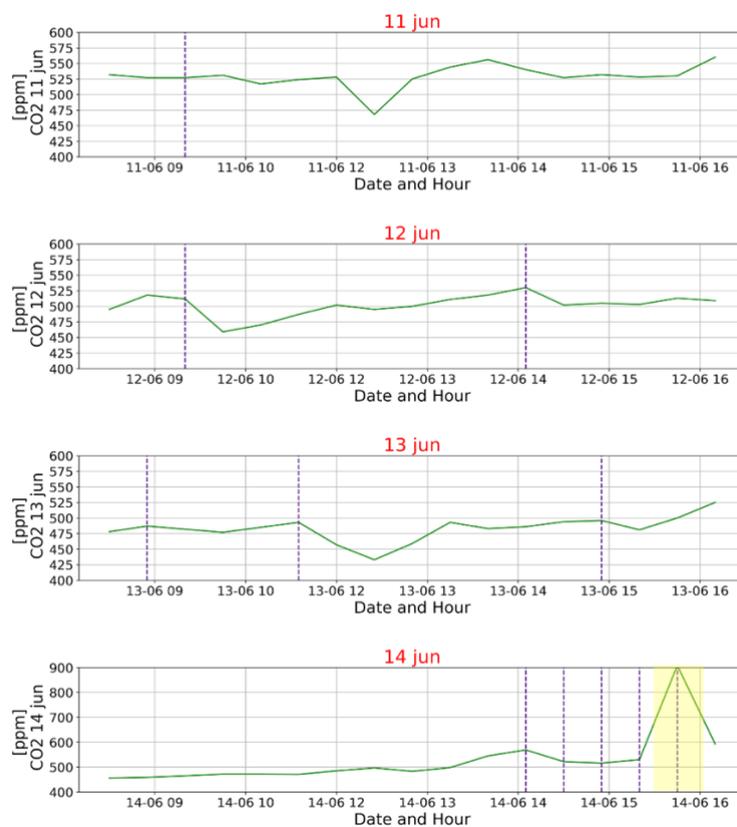
Figura 16 - Stanza C: Temperatura e sPMV nei quattro giorni



In C (Figura 16) sono sempre stati seguiti i consigli del robot; quindi, la *Suggestion Compliance* è del 100%.

Nella totalità dei casi a parte uno, è stato rilevato un discomfort di tipo termico causato da una temperatura indoor superiore alla soglia. Non si sono analizzati, quindi, gli altri parametri attraverso indici appositi. Si riporta in questa istanza solamente il grafico della concentrazione di CO2 per la stanza B, in cui per una volta durante il quarto giorno il robot si è attivato per aver rilevato una concentrazione di diossido di carbonio troppo alta (evidenziato in giallo nella Figura 17). In questo caso si è misurato un successo dopo l'apertura della finestra. Si potrebbe dire che il Success Rate per la CO2 è del 100%, sebbene questo dato sia statisticamente irrilevante.

Figura 17 - Livello di concentrazione di CO2 nella stanza B



In Tabella 7 si riportano i valori degli indici, che permettono di valutare le prestazioni del setup di misura e dell'algorithmo proposto.

	A (East)	B (West)	C (North)
<b>n. activations</b>	14	11	13
<b>n. window openings</b>	5	8	13
<b>suggestion compliance</b>	<b>36%</b>	<b>73%</b>	<b>100%</b>
<b>success rate</b>	<b>60.0%</b>	<b>75.0%</b>	<b>84.6%</b>
<b>average sPMV increment</b>	<b>-19.5%</b>	<b>-55.2%</b>	<b>-44.4%</b>
<b>75° percentile of increments</b>	-8.3%	-3.4%	-16.7%
<b>comfort rate</b>	56%	64%	57%

Tabella 7 - Valori degli indici per la valutazione dell'esperimento

Nella base A il robot è intervenuto consigliando la regolazione dell'IEQ per 14 volte. Di queste, solo in 5 l'utente ha ritenuto opportuno aprire la finestra, andando a ridurre drasticamente il la *Suggestion Compliance* al 36%. Nelle restanti 9, esternamente faceva troppo caldo, il vento era pressoché assente (ciò era in contrasto con i dati ottenuti dal robot) e il sistema di condizionamento dell'aria era acceso. Da questo si evince una possibilità per migliorare questo metodo: includere, nei suggerimenti, anche la regolazione dei condizionatori e delle tapparelle, nelle ore in cui la finestra è direttamente irradiata dai raggi solari. In questa base, l'aver seguito il suggerimento ha portato a migliorare il comfort termico oggettivo nella mezz'ora successiva all'intervento, nel 60% delle volte. Questo dato è minore rispetto agli altri due ambienti, probabilmente poiché la stanza A è notevolmente più grande ma ha comunque sempre una sola finestra apribile, e perché, essendo esposta ad Est, le pareti esterne sono più irradiate dal Sole nella maggior parte delle ore lavorative. Per gli stessi motivi, l'incremento medio dell'sPMV rispetto a quello precedente all'apertura della finestra è del -19.5%.

Nella base B, degli 11 suggerimenti da parte del robot, 8 sono stati seguiti. 1 volta la finestra non è stata aperta per folate di forte vento non rilevate dal robot; 2 volte perché fuori faceva troppo caldo e i condizionatori erano accesi. La *Suggestion Compliance* qui è al 73%, il *Success Rate* al 75.0% e l'incremento medio di sPMV è del -55.2%.

In C sono stati seguiti tutti e 13 i consigli. La *Suggestion Compliance* è quindi al 100%. Il *Success Rate* è all'84.6% e l'incremento medio di sPMV è del -44.4%.

Si noti come, sebbene il Success Rate sia maggiore in C rispetto che in B, l'incremento medio di sPMV è minore. Ciò denota una sostanziale differenza delle condizioni esterne alle finestre nei due ambienti, che hanno portato a dissipare più velocemente il calore in B.

Il 75% degli incrementi di sPMV si sono mantenuti sotto il -8.3% in A, sotto il -3.4% in B e sotto il -16.7% in C.

I valori del *comfort rate*, che indica in che percentuale del numero totale di misure l'sPMV è rimasto compreso nel range di comfort [-0.5; +0.5], sono stati penalizzati dall'impostazione della soglia di temperatura del primo giorno a 28°C anziché 26.5°C. Ciò li ha abbassati al: 56%, 64% e 57%. Infatti, nel primo giorno il valore medio di sPMV nelle tre stanze è stato rispettivamente di: 0.73, 0.85 e 0.99.

Tralasciando il primo giorno, la media dei valori di sPMV degli ultimi 3 giorni è stata di: 0.27 nella stanza A, 0.34 in B e 0.35 in C.

# Capitolo 6: Conclusioni

Lo studio ha lo scopo di utilizzare un set-up di misura formato da robot sociale per misurare il comfort indoor ed interagire vocalmente con l'utente al fine di guidarlo nella regolazione manuale dell'ambiente circostante, in risposta a dati ambientali raccolti da un rete di sensori. In questo modo, lo aiuta a diventare più consapevole della qualità ambientale, lasciandogli la libertà di adattare i consigli alle proprie esigenze e sensazioni.

L'esperimento mostra che, nelle tre stanze prese in esame, i suggerimenti del robot sono stati seguiti il 36%, 73% e 100% delle volte. Dopo ogni suggerimento seguito, si è verificato un miglioramento medio del comfort termico rispettivamente del 19.5%, del 55.2% e del 44.4%. Di tutti i suggerimenti seguiti, rispettivamente il 60.0%, 75.0% e 84.6% hanno portato un generale miglioramento del comfort termico. Il robot si è attivato una sola volta per una causa che non fosse dovuta a temperatura dell'aria troppo alta, ovvero per una concentrazione di CO<sub>2</sub> sopra la soglia di accettabilità individuata.

Tra i limiti della metodologia utilizzata c'è innanzitutto il fatto che i suggerimenti agli utenti riguardano solo il metodo di regolazione per ventilazione naturale, aprendo le finestre. Come si ha già avuto modo di dire, questo tipo di regolazione è molto adatto per le mezze stagioni o al fine di regolare la concentrazione di CO<sub>2</sub>, mentre si può rivelare limitante per climi poco miti, estivi o invernali. Inoltre, i dati meteorologici relativi al centro città non hanno permesso di individuare situazioni outdoor locali quali folate di vento.

Futuri lavori che riprenderanno tali metodi si potranno concentrare sul fornire suggerimenti che considerino la regolazione del sistema di condizionamento dell'aria. Potranno includere un'interazione bilaterale che permetta di ricevere riscontri diretti dall'utente nel caso lo desideri, sempre mantenendo un'invasività minima nei modi e nei tempi dei dialoghi. In questo, si consiglia l'utilizzo del robot sociale Misty II. Si potrà fare un altro passo in avanti anche integrando informazioni che riescano a quantificare l'effetto che le regolazioni dell'IEQ hanno sull'efficienza energetica dell'edificio, rendendo l'utente consapevole e sensibile riguardo non solo le proprie esigenze, ma anche quelle dell'edificio e dell'ambiente.

Più in generale, in futuro si potrà partire da questo lavoro per sviluppare nuovi modi di pensare l'interazione tra robot sociale e utente, applicata all'ambito del comfort in contesti lavorativi, domestici e scolastici, al fine di monitorare il benessere delle persone e dare ciò che un sistema totalmente automatizzato non può garantire.

# Riferimenti bibliografici

- [1] V. I. Fissore, «Indoor Environmental Quality and Comfort in Offices: A Review,» *buildings*, 2023.
- [2] H. Choi, «An individual weightage for indoor environmental quality component to enhance work performance in office buildings,» *Building and Environment*, 2023.
- [3] R. Kishi, «Indoor Environmental Quality and Health Risk toward Healthier Environment for All,» *Springer*, 2020.
- [4] I. Mujan, «Influence of indoor environmental quality on human health and productivity - A review,» *Journal of Cleaner Production*, 2019.
- [5] O. Zierke, «Influence of personal control on thermal comfort: A psychological effect or just the “right” temperature?,» *Energy & Buildings*, 2023.
- [6] M. Luo, «The underlying linkage between personal control and thermal comfort: Psychological or physical effects?,» *Energy and Buildings*, 2016.
- [7] V. A. Arowoija, «Influence of Thermal Comfort on Energy Consumption for Building Occupants: The Current State of the Art,» *buildings*, 2024.
- [8] P. Ribino, «A Humanoid Social Robot Based Approach for Indoor Environment Quality Monitoring and Well-Being Improvement,» *International Journal of Social Robotics*, 2020.
- [9] H. Wang, «Experimental investigation about effect of emotion state on people’s thermal comfort,» *Energy & Buildings*, 2023.
- [10] I. P. Herman, «Physics of the Human Body,» *Springer*.
- [11] M. .. Moran, «Elementi di Fisica tecnica per l'ingegneria,» 2003.
- [12] G. Park, «Modeling heat transfer in humans for body heat harvesting and personal thermal management,» *Applied Energy*, 2022.
- [13] H. Guo, «On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment, a critical review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.
- [14] D.F.BREBNER, «THE DIFFUSION OF WATER VAPOUR THROUGH HUMAN SKIN,» 1955.
- [15] C. Buratti, «HVAC systems testing and check: A simplified model to predict thermal comfort conditions in moderate environments,» *Applied Energy*, 2013.
- [16] C. Heracleous, «Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period,» *Journal of Building Engineering*, 2019.
- [17] J. Miura, «Thermal comfort measurement using thermal-depth images for robotic monitoring,» *Pattern Recognition Letters*, 2020.
- [18] G. Kim, «Towards Deployment of Mobile Robot driven Preference Learning for User-State-Specific Thermal Control in A Real-World Smart Space,» *Proceedings of the 38th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, 2023.
- [19] A. Nagayo, «Indoor Environment and Health Protocol Monitoring and Control System Integrated into a Smart Robot to Promote Safety on University Campuses,» *Proceedings of the Second International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS-2023)*, 2023.
- [20] R. K. Bhagat, «Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19,» *Journal of Fluid Mechanics*, 2020.

# Appendici

## Appendice A

Formulazione del PMV proposta dalla norma ISO 7730:

$$PMV = (0.303 \cdot e^{-0.036 M} + 0.028) \left\{ \left( M - \frac{\dot{W}}{A_b} \right) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ 5733 - 6.99 \left( M - \frac{\dot{W}}{A_b} \right) \cdot \varphi \cdot p_{VS,a} \right] - 0.42 \right. \\ \cdot \left[ \left( M - \frac{\dot{W}}{A_b} \right) - 58.15 \right] - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - \varphi \cdot p_{VS,a}) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) \\ \left. - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{MR} + 273)^4] - f_{cl} h (T_{cl} - T_a) \right\}$$

Dove:

$M = [W/m^2]$ : potenza unitaria metabolica del corpo umano

$\frac{\dot{W}}{A_b} = [W/m^2]$ : potenza unitaria meccanica

$\varphi$ : umidità relativa

$p_{VS,a}$ : pressione di saturazione dell'acqua alla temperatura dell'aria ambientale

$T_a = [^{\circ}C]$ : temperatura dell'aria indoor

$f_{cl} = \frac{A_{cl}}{A_s}$ : coefficiente di abbigliamento:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot I_{cl} & \text{se } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \text{ } ^{\circ}C/W \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} & \text{se } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \text{ } ^{\circ}C/W \end{cases}$$

$I_{cl} = [m^2 \text{ } ^{\circ}C/W]$ : resistenza termica dell'abbigliamento

$h$ : coefficiente di scambio termico per convezione:

$$h = \begin{cases} 2.38 \cdot (T_{cl} - T_a)^{0.25} & \text{se } 2.38 \cdot (T_{cl} - T_a)^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}} & \text{se } 2.38 \cdot (T_{cl} - T_a)^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$v_{ar} = [m/s]$ : velocità relativa tra aria e corpo

$T_{cl} = [^{\circ}C]$ : temperatura dell'abbigliamento:

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028 \left( M - \frac{\dot{W}}{A_b} \right) - I_{cl} \{ 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{MR} + 273)^4] + f_{cl} h (T_{cl} - T_a) \}$$

## Appendice B

```
from datetime import datetime

loop_count = 0

while loop_count < 20:
    now = datetime.now()
    now_posix = int(now.timestamp())

    if now_posix%1800 == 0:
        loop_count += 1
        print(f'Loop count: {loop_count}')
```

## Appendice C

```
import pandas as pd

CR = pd.DataFrame()

WCR = pd.DataFrame({
    'min': [20, 40, 0, 0],
    'max': [25.5, 60, 55, 750]
}, index=['T', 'RH', 'N', 'CO2'])

SCR = pd.DataFrame({
    'min': [23, 40, 0, 0],
    'max': [26.5, 60, 55, 750]
}, index=['T', 'RH', 'N', 'CO2'])

if temperature_METEO <= SCR.loc['T', 'min']:
    CR = WCR
    print('CR = Winter CR')
else:
    CR = SCR
    print('CR = Summer CR')
```

## Appendice D

```
#CREATES A DICT
discomfort_A = {
    'd_T1': [False, TEMPERATURE_A.iloc[-1]],
    'd_T0': [False, TEMPERATURE_A.iloc[-1]],
    'd_RH0': [False, HUMIDITY_A.iloc[-1]],
    'd_RH1': [False, HUMIDITY_A.iloc[-1]],
    'd_N': [False, noise_A.iloc[-1]],
    'd_CO2': [False, CO2_A.iloc[-1]],
}

#MODIFIES THE DICT DEPENDING ON DATA and COMFORT RANGE
if TEMPERATURE_A.iloc[-1] >= CR.loc['T', 'max']:
    discomfort_A['d_T1'][0] = True
if TEMPERATURE_A.iloc[-1] <= CR.loc['T', 'min']:
    discomfort_A['d_T0'][0] = True
if HUMIDITY_A.iloc[-1] >= CR.loc['RH', 'max']:
    discomfort_A['d_RH1'][0] = True
if HUMIDITY_A.iloc[-1] <= CR.loc['RH', 'min']:
    discomfort_A['d_RH0'][0] = True
if CO2_A.iloc[-1] >= CR.loc['CO2', 'max']:
    discomfort_A['d_CO2'][0] = True
if noise_A.iloc[-1] >= CR.loc['N', 'max']:
    discomfort_A['d_N'][0] = True
```

# Appendice E

```
from mistyPy.Robot import Robot
ROBOT_IP = ROBOT_IP
misty = Robot(ROBOT_IP)

_AB_ = 1.70
_BC_ = 2.40
_CD_ = 10.30
_DE_ = 3.60
_EF_ = 2
_EG_ = 1.10
_GH_ = 3.50
_HI_ = 1.30

def mistyComesFrom_C():
    print('mistyComesFrom_C')
    misty.drive_arc(90,0,2000,'false')
    time.sleep(7)
    misty.drive_heading(90, _HI_, 4000, "false")
    time.sleep(8)

    misty.drive_arc(0,0,2000,'false')
    time.sleep(7)
    misty.drive_heading(0, _GH_, 8000, "false")
    time.sleep(13)

    misty.drive_arc(90,0,2000,'false')
    time.sleep(7)
    misty.drive_heading(90, _DE_ + _EG_, 10000,'false')
    time.sleep(16)

    misty.drive_arc(180,0,2000,'false')
    time.sleep(7)
    misty.drive_heading(180, _CD_, 22000,'false')
    time.sleep(28)

    misty.drive_arc(-90,0,2000,'false')
    time.sleep(7)
    misty.drive_heading(-90, _BC_, 5000,'false')
    time.sleep(10)

    misty.drive_arc(180,0,2000,'false')
    time.sleep(7)
    misty.drive_heading(180, _AB_, 3000,'false')
    time.sleep(8)

    misty.drive_arc(0,0,2000,'false')
    time.sleep(12)
```

# Appendice F

```
def mistyInteracts_A():
    Dist_Count_A = 0
    OpenW_count_A = 0

    if discomfort_A['d_T1'][0] == True:
        if Dist_Count_A == 0:
            misty.speak("Ei, scusa il disturbo!",1,1,"it-it-x-itb-local")
            Dist_Count_A += 1
            time.sleep(3)
        if OpenW_count_A == 0 and window_reg_A == True:
            misty.speak("Ti consiglio di aprire la finestra per quindici minuti circa!",1,1,"it-it-x-itb-local")
            OpenW_count_A += 1
            time.sleep(3)
            if temperature_METEO < discomfort_A['d_T1'][1] and wind_speed_METEO < 7:
                misty.speak("Fuori è più fresco e non c'è troppo vento!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
                time.sleep(4)
            elif temperature_METEO > discomfort_A['d_T1'][1] and ((temperature_METEO - discomfort_A['d_T1'][1]) < 2) and (wind_speed_METEO >
0.2 and wind_speed_METEO < 7):
                misty.speak("Il leggero vento raffrescherà l'ambiente, anche se fuori è più caldo ", 1,1,"it-it-x-itb-local")
                time.sleep(5)
            misty.speak(f"La temperatura è troppo alta! Sono {TEMPERATURE_A.iloc[-1]} gradi!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
            time.sleep(5)
            misty.speak(f"Dovrebbero essere tra i {CR.loc['T','min']} e i {CR.loc['T','max']}", 1,1,"it-it-x-itb-local")
            time.sleep(5)

    if discomfort_A['d_T0'][0] == True:
        if Dist_Count_A == 0:
            misty.speak("Ei, scusa il disturbo!",1,1,"it-it-x-itb-local")
            Dist_Count_A += 1
            time.sleep(3)
        if OpenW_count_A == 0 and window_reg_A == True:
            misty.speak("Ti consiglio di aprire la finestra per quindici minuti circa!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
            OpenW_count_A += 1
            time.sleep(4)
            misty.speak("Fuori è più caldo e non c'è troppo vento!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
            time.sleep(4)
        misty.speak(f"La temperatura è troppo bassa! Sono {TEMPERATURE_A.iloc[-1]} gradi!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(5)
        misty.speak(f"Dovrebbero essere tra i {CR.loc['T','min']} e i {CR.loc['T','max']}", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(5)

    if discomfort_A['d_RH1'][0] == True:
        if Dist_Count_A == 0:
            misty.speak("Ei, scusa il disturbo!",1,1,"it-it-x-itb-local")
            Dist_Count_A += 1
            time.sleep(3)
        if OpenW_count_A == 0 and window_reg_A == True:
            misty.speak("Ti consiglio di aprire la finestra per quindici minuti circa!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
            OpenW_count_A += 1
            time.sleep(4)
        misty.speak(f"L'umidità è troppo alta! È al {HUMIDITY_A.iloc[-1]} percento!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(5)
        misty.speak(f"L'umidità relativa dovrebbe essere tra {CR.loc['RH','min']} e {CR.loc['RH','max']}", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(5)

    if discomfort_A['d_RH0'][0] == True:
        if Dist_Count_A == 0:
            misty.speak("Ei, scusa il disturbo!",1,1,"it-it-x-itb-local")
            Dist_Count_A += 1
            time.sleep(3)
        if OpenW_count_A == 0 and window_reg_A == True:
            misty.speak("Ti consiglio di aprire la finestra per quindici minuti circa!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
            OpenW_count_A += 1
            time.sleep(4)
        misty.speak(f"L'umidità è troppo bassa! È al {HUMIDITY_A.iloc[-1]} percento!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(5)
        misty.speak(f"L'umidità relativa dovrebbe essere tra {CR.loc['RH','min']} e {CR.loc['RH','max']}", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(5)

    if discomfort_A['d_CO2'][0] == True:
        if Dist_Count_A == 0:
            misty.speak("Ei, scusa il disturbo!",1,1,"it-it-x-itb-local")
            Dist_Count_A += 1
            time.sleep(3)
        if OpenW_count_A == 0 and window_reg_A == True:
            misty.speak("Ti consiglio di aprire la finestra per quindici minuti circa!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
            OpenW_count_A += 1
            time.sleep(4)
        misty.speak(f"La concentrazione di CO2 è troppo alta, a {CO2_A.iloc[-1]} ppm!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(5)
        misty.speak(f"il livello di CO2 dovrebbe essere inferiore a {CR.loc['CO2','max']} ppm", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(5)

    if discomfort_A['d_N'][0] == True:
        if Dist_Count_A == 0:
            misty.speak("Ei, scusa il disturbo!",1,1,"it-it-x-itb-local")
            Dist_Count_A += 1
            time.sleep(3)
        misty.speak(f"IL rumore in questo ambiente è stato troppo alto negli ultimi 30 minuti! Sono stati misurati {noise_A.iloc[-1]}
decibel!", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(6)
        misty.speak(f"Per una buona concentrazione, non dovrebbe essere superiore a {CR.loc['N','max']} Decibel", 1,1,"it-it-x-itb-local")
        time.sleep(6)
```

## Dediche

*Alla mia famiglia, per i valori che mi ha trasmesso e per essere sempre stata presente in questi anni.*

*Alle persone che hanno inciso nella mia vita e a quelle che verranno.*

*Alla costanza, alla determinazione, all'avventura e alla noia.*

*Alla bellezza della vita e alla sensibilità nel coglierla.*

*It's harsh for me to wait  
for you to come,  
but somehow I learnt  
to enjoy and love  
all the small things  
my day is made of.*

*I filled my past with hope  
but now that is for what?  
It's useless to depend  
on what may not happen.*

*Instead now I feel free  
to listen to my heart.  
or I'm supposed to be?*

*The fortune may be hostile  
and not indulge my needs  
but I'll follow my instinct  
and focus on my being.*

*And show me to the world  
for who I really am.*

*The time will come  
When, with elation  
You will greet yourself arriving  
At your own door, in your own mirror.  
And each will smile at the other's welcome.*

*And say, sit there. Eat.  
You will love again the stranger who was yourself.  
Give wine. Give bread. Give back your heart  
To itself, to the stranger who has loved you*

*All your life, whom you ignored  
For another, who knows you by heart.  
Take down the love letters from the bookshelf,*

*The photographs, the desperate notes,  
Peel your own image from the mirror.  
Sit. Feast on your life.*

*Derek Walcott*