



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **Ingegneria Meccanica**

Sviluppo e validazione di un modello per la misura del comfort termico in ambienti indoor

Development and validation of a model for measuring thermal comfort in indoor environments

Relatore:

Prof. Gian Marco Revel

Tesi di Laurea di:

Pasquale Scalzi

Correlatrici:

Dott.sa Ing. Vittoria Cipollone

Dott.sa Ing. Nicole Morresi

A.A. 2023 / 2024

INDICE

ABSTRACT.....	1
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE.....	2
1.1 Scopo del lavoro.....	4
1.2 Stato dell'arte.....	4
1.2.1 Il comfort termico.....	4
1.2.2 La termoregolazione.....	5
1.2.3 Equazione di bilancio dell'energia.....	5
1.2.4 Modelli per la misura del comfort termico.....	7
1.2.5 Modelli semplificati per il calcolo del PMV.....	9
1.2.6 Limiti dello stato dell'arte.....	11
CAPITOLO 2: MATERIALI E METODI.....	13
2.1 Selezione del database.....	13
2.2 Analisi dei dati e creazione dei dataset.....	14
2.3 Modelli di ottimizzazione.....	20
2.3.1 Ottimizzazione dei coefficienti del modello PMV semplificato.....	25
CAPITOLO 3: RISULTATI.....	27
3.1 Metriche di validazione e coefficienti ottimizzati.....	27
3.2 PMV semplificato ottimizzato.....	28
3.3 Analisi di sensibilità e categorie del PMV.....	31
CAPITOLO 4: DISCUSSIONI.....	35
CAPITOLO 5: CONCLUSIONI.....	36
BIBLIOGRAFIA.....	37

ABSTRACT

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è ottimizzare un modello semplificato già esistente in letteratura per il calcolo del PMV (Predicted Mean Vote); l'ottimizzazione consiste nella determinazione di nuovi coefficienti dell'equazione di tale modello tenendo in considerazione le diverse zone climatiche in cui è suddivisa l'Europa.

L'ottimizzazione verrà effettuata utilizzando sei diversi algoritmi di ottimizzazione che serviranno per determinare il miglior modello che minimizza l'errore tra il PMV calcolato secondo norma UNI EN ISO 7730 e il PMV calcolato con il modello semplificato.

Per la precisione, dopo aver effettuato una panoramica su cos'è il PMV, come si calcola e quali sono le motivazioni che hanno condotto allo sviluppo di un modello semplificato per il suo calcolo, sarà esposta la metodologia utilizzata per effettuare l'ottimizzazione. Si partirà dalla determinazione del database per ricavare i dati necessari impiegati per raggiungere l'obiettivo precedentemente esposto; saranno quindi ricavati cinque dataset, uno per ogni nazione europea selezionata, le quali appartengono a cinque zone climatiche diverse. Successivamente saranno presentati e descritti i sei algoritmi di ottimizzazione adoperati e le motivazioni che hanno determinato la scelta del miglior modello (basandosi sull'utilizzo delle metriche di valutazione MAE e MSE).

Successivamente verranno riportati i risultati numerici e i grafici del modello ottimizzato che saranno confrontati con i risultati numerici e i grafici sia del PMV semplificato di partenza sia del PMV calcolato secondo la norma UNI EN ISO 7730, in modo da validare l'ottimizzazione effettuata.

1. INTRODUZIONE

Il comfort termico è definito dall'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) come *“la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico”*; ovvero, è la sensazione di benessere provata dall'individuo in un determinato ambiente indoor [1].

Il comfort termico è quindi un concetto soggettivo perché le sensazioni termiche provate possono essere differenti tra vari individui anche se questi si trovano nello stesso ambiente; l'indice utilizzato per quantificare il comfort termico è il Predicted Mean Vote o Voto Medio Previsto (PMV).

Il PMV rappresenta il voto medio espresso da un ampio campione di persone basato sulla scala di sensazione termica riportata di seguito:

VOTO	SENSAZIONE TERMICA SOGGETTIVA
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutralità
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Il PMV è normato dagli standard **UNI EN ISO 7730** e **ASHRAE 55-2010**; secondo la norma UNI EN ISO 7730 [2], il PMV può essere calcolato mediante un'equazione dipendente da sei parametri (Fig. 1) $PMV = f(T_a, T_r, V_a, RH, I_{cl}, M)$, ovvero:

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5\,733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5\,867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ -3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\}$$

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

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases}$$

Figura 1. Equazione PMV norma UNI EN ISO 7730

dove:

- T_a è la temperatura interna,
- T_r è la temperatura media radiante,
- V_a è la velocità dell'aria,
- RH è l'umidità relativa,
- I_{cl} è l'isolamento termico del vestiario,
- M è l'indice metabolico.

Di questi parametri T_a , T_r , V_a e RH sono delle grandezze ambientali mentre I_{cl} e M sono delle grandezze che variano da individuo a individuo.

Il PMV deriva da studi statistici condotti in laboratori, per questo motivo quando viene impiegato in condizioni reali evidenzia delle limitazioni [3]:

1. È stato ideato per prevedere il comfort termico medio di un ampio gruppo di utenti, quindi non sempre fornisce misure accurate se applicato a un gruppo più piccolo di utenti.
2. È difficile valutare l'esatto valore delle variabili in input nonostante esistano norme che specifichino come le quantità per la valutazione del PMV debbano essere misurate; in particolare l'indice metabolico può variare durante la giornata e l'isolamento termico del vestiario può non essere costante nel tempo.
3. Non tutti i sei parametri sono sempre misurabili.

A causa di queste limitazioni sono stati condotti degli studi per semplificare l'equazione del PMV, al fine di renderla dipendente da un minor numero di parametri facilmente misurabili. Rohles F.H. [4] ha semplificato questa equazione rendendola funzione solo della temperatura interna (T_a) e dell'umidità relativa (RH). L'equazione sviluppata è la seguente:

$$PMV = aT_a + bP_v - c \quad (1)$$

dove:

- T_a è la temperatura dell'aria (°C)
- P_v è la pressione di vapore acqueo (kPa) che dipende dall'umidità relativa RH secondo la relazione $P_v = (RH * P_s) / 100$ in cui P_s è la pressione di vapore saturo.

L'equazione riportata presenta delle limitazioni, tra le quali la principale riguarda la sua validità esclusivamente per il valore di isolamento termico del vestiario $I_{cl}=0.6$. Per questo valore sono stati calcolati i coefficienti **a**, **b**, **c** e i valori ottenuti sono **a=0.245**, **b=0.248**, **c=6.475**.

Successivamente Buratti et al. [5] hanno aggiornato tale modello in modo da ampliarne la sua applicazione. L'equazione è la stessa del modello di Rohles ma sono stati determinati tre intervalli di isolamento termico del vestiario I_{cl} e per ognuno di essi sono stati calcolati nuovi coefficienti **a**, **b**, **c**. I valori ottenuti sono i seguenti:

- Per $I_{cl} = 0.25-0.50 \rightarrow a=0.2803$, $b=0.1717$, $c=7.1383$.
- Per $I_{cl} = 0.51-1.00 \rightarrow a=0.1383$, $b=0.0269$, $c=3.0190$.
- Per $I_{cl} = 1.01-1.65 \rightarrow a=0.1478$, $b=-0.1371$, $c=2.5239$.

Poiché il modello di Buratti et al. [5] differisce dal modello definito nella norma UNI EN ISO 7730 [2], l'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di ottimizzare il modello per determinare il PMV semplificato in modo da ridurre l'errore tra questo e il modello standard.

L'ottimizzazione è stata effettuata tramite l'utilizzo di sei modelli di ottimizzazione (**Nelder-Mead**, **BFGS**, **Newton-CG**, **Trust-NCG**, **Trust-Krylov**, **Trust-Exact**) implementati con il linguaggio di programmazione Python, mediante i quali sono stati calcolati i nuovi coefficienti **a**, **b**, **c** per i tre intervalli di isolamento termico del vestiario I_{cl} determinati da Buratti et al. [5], che hanno permesso di ridurre l'errore tra i modelli citati.

1.1 SCOPO DEL LAVORO

L'equazione per il calcolo del PMV riportata nella norma UNI EN ISO 7730 è funzione di sei parametri: temperatura interna (T_a), temperatura media radiante (T_r), velocità dell'aria (V_a), umidità relativa (**RH**), isolamento termico del vestiario (I_{cl}) e indice metabolico (**M**). Considerando che i parametri non sono sempre tutti disponibili e che il PMV, determinato attraverso studi condotti in laboratorio, presenta delle limitazioni quando viene applicato in condizioni reali, sono stati eseguiti degli studi che hanno permesso di determinare un'equazione semplificata per il calcolo del PMV in modo da renderlo funzione unicamente della temperatura dell'aria (T_a) e dell'umidità relativa (RH). L'equazione è stata sviluppata da Rohles F.H [4] e successivamente Buratti et al. [5] ne hanno ampliato la sua applicazione; tuttavia, questa equazione ($PMV = aT_a + bP_v - c$) presenta una problematica, ovvero la discrepanza tra il PMV calcolato con essa e il PMV calcolato con la norma UNI EN ISO 7730 [2].

Pertanto lo scopo di questo lavoro di tesi è ottimizzare il modello di comfort semplificato proposto da Buratti et al. per ridurre l'errore tra esso e il PMV standard. Per raggiungere questo obiettivo, sono stati utilizzati sei modelli di ottimizzazione (**Nelder-Mead**, **BFGS**, **Newton-CG**, **Trust-NCG**, **Trust-Krylov**, **Trust-Exact**) che hanno portato a nuovi coefficienti **a**, **b**, **c** dell'equazione precedentemente citata. Tale procedimento, si è basato sull'utilizzo di dati ambientali reali misurati in diverse parti d'Europa con l'obiettivo di dimostrare la validità dei coefficienti ottimizzati nelle diverse zone climatiche europee.

1.2 STATO DELL' ARTE

1.2.1 IL COMFORT TERMICO

Secondo l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) il comfort termico è *"la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico"*.

Le sensazioni termiche provate dagli individui (sensazione di caldo o freddo) sono differenti anche se questi si trovano nello stesso ambiente; infatti le persone, nonostante siano soggetti allo stesso clima e appartengano alla stessa cultura, forniscono opinioni differenti sul comfort termico a causa della combinazione di un ampio numero di fattori che influenzano la percezione

degli esseri umani. Nel 1962, Macpherson [1] definì sei fattori che influenzano la sensazione termica:

- 1) quattro variabili fisiche: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria, umidità relativa,
- 2) due variabili personali: isolamento termico del vestiario, indice metabolico.

1.2.2 LA TERMOREGOLAZIONE

Le funzioni fisiologiche del corpo umano possono svolgersi correttamente solo in un intervallo di temperatura intorno ai 37 [°C] e per mantenere la temperatura pressoché costante l'ipotalamo attua delle strategie compensatrici. [6]

In particolare il corpo umano per evitare una diminuzione della temperatura può:

- Diminuire la temperatura della pelle mediante il restringimento dei vasi sanguigni, in modo da ridurre il flusso termico disperso verso l'esterno
- Incrementare il metabolismo M modificando il comportamento (come incrementare l'attività fisica o modificare l'abbigliamento) o mediante la comparsa dei brividi

Invece, per evitare un aumento della temperatura può:

- Aumentare la temperatura della pelle mediante dilatazione dei vasi sanguigni, in modo da incrementare il flusso termico disperso verso l'esterno
- Evaporazione del sudore

L'ipotalamo gestisce il sistema nervoso autonomo il quale regola i processi fisiologici; in particolare il sistema nervoso autonomo è suddiviso in sistema simpatico e sistema parasimpatico. [7]

- Il sistema simpatico agisce in una situazione di pericolo e determina l'aumento della pressione sanguigna e del battito cardiaco, la dilatazione delle pupille, la dilatazione dei bronchi e il blocco del sistema digestivo
- Il sistema parasimpatico agisce in condizioni di riposo e determina la diminuzione della pressione arteriosa, il rallentamento del battito cardiaco e della respirazione, e favorisce la funzionalità dell'apparato digerente

Quindi la sensazione di comfort termico corrisponde ad una situazione di equilibrio in cui i meccanismi precedentemente esposti non intervengono.

1.2.3 EQUAZIONE DI BILANCIO DELL'ENERGIA

Considerando quanto appena enunciato circa la termoregolazione, questo paragrafo illustra il concetto alla base degli scambi di energia tra il corpo umano e l'ambiente circostante. Esso è basato sull'equazione di bilancio dell'energia del corpo umano [6] riportata di seguito:

$$M = C + R + E + P \quad (2)$$

dove:

1. **M** è la potenza generata dall'attività metabolica [W]
2. **P** è la potenza meccanica scambiata con l'esterno [W]
3. **C** è il flusso termico fornito all'esterno per convezione [W]
4. **R** è il flusso termico all'esterno per irraggiamento corpo-oggetti esterni [W]
5. **E** è il flusso termico impegnato per evaporare acqua [W]

Se **M** è diverso dalla somma **C + R + E + P** vuol dire che si avrà un aumento o una diminuzione della temperatura corporea, ovvero non si è nella situazione di comfort termico. Di seguito, verranno approfonditi tutti gli elementi presenti in Equazione 2.

POTENZA GENERATA DALL'ATTIVITÀ METABOLICA (M)

Solitamente anziché far riferimento all'attività metabolica **M** [W], si fa riferimento all'attività metabolica specifica **M/A** [W/m²] dove **A** (area di Dubois) è espressa dalla seguente relazione:

$$A = 0.202 (m_b)^{0.425} (h_b)^{0.725} \quad (3)$$

dove:

- **A** è la superficie del corpo umano nudo [m²]
- **m_b** è la massa [kg]
- **h_b** è l'altezza [m]

L'unità di misura dell'attività metabolica specifica **M/A** può anche essere espressa in **met**, per la precisione **1 met = 58,2 [W/m²]**. Oltre all'attività metabolica un altro aspetto molto importante da considerare è la resistenza termica determinata dall'abbigliamento; quindi si introduce la **resistenza termica specifica dell'abbigliamento R'_{ab}**. La sua unità di misura è [m²K / W] ma può anche essere espressa con l'unità di misura **clo** dove **1 clo = 0,155 m²K / W**

POTENZA MECCANICA SCAMBIATA CON L'ESTERNO (P)

Il corpo umano per ottenere una potenza meccanica **P** "utilizza" la potenza metabolica **M** ottenuta mediante l'alimentazione. In particolare solo una piccola parte della potenza metabolica **M** viene trasformata in potenza meccanica **P**; il resto viene disperso in ambiente sotto forma di potenza termica (**C + R + E**).

FLUSSO TERMICO SCAMBIATO PER CONVEZIONE (C) E IRRAGGIAMENTO (R)

Il flusso termico tra la superficie esterna del corpo umano e l'ambiente circostante è scambiato sia per convezione che per irraggiamento. In particolare il primo è costituito dalla somma di due termini: **C_{resp}** ovvero il flusso termico convettivo dovuto alla respirazione (perché l'aria si riscalda per convezione termica all'interno dei polmoni) e **C_{conv}** cioè il flusso termico convettivo della pelle.

Il flusso termico scambiato per convezione è funzione della temperatura dell'aria (**T_a**) e della velocità dell'aria (**V_a**):

$$C=f(T_a, V_a) \quad (4)$$

mentre il flusso termico scambiato per irraggiamento è funzione della temperatura media radiante (T_r):

$$R=f(T_r) \quad (5)$$

FLUSSO TERMICO DOVUTO ALL'EVAPORAZIONE (E)

Il flusso termico **E** dovuto all'evaporazione è dato dalla somma di tre contributi:

- E_r dovuto alla respirazione
- E_d dovuto all'evaporazione di acqua dall'interno del corpo attraverso la pelle (processo di diffusione di vapore)
- E_t dovuto alla traspirazione, cioè al ricoprimento della pelle con un film d'acqua (sudore)

Il flusso termico dovuto all'evaporazione è funzione della temperatura dell'aria T_a e dell'umidità relativa RH:

$$E=f(T_a, RH) \quad (6)$$

Riassumendo quanto appena visto, i parametri che influenzano l'equazione di bilancio dell'energia sono quindi sei; quattro parametri ambientali (temperatura dell'aria T_a , temperatura media radiante T_r , velocità dell'aria V_a e umidità relativa **RH**) e due parametri soggettivi (isolamento termico del vestiario I_{cl} e indice metabolico **M**).

1.2.4 MODELLI PER LA MISURA DEL COMFORT TERMICO

Attualmente esistono due metodi differenti per la definizione del comfort termico ovvero "il metodo di Fanger" e "il metodo adattivo". Il primo utilizza dati raccolti dagli studi in camere climatiche mentre il secondo utilizza dati provenienti da studi condotti negli edifici reali; in particolare il modello di Fanger è lo studio sul quale si basano le principali norme internazionali come UNI EN ISO 7730.

• **PREDICTED MEAN VOTE E PERCENTAGE OF PEOPLE DISSATISFIED**

Il modello di Fanger è stato sviluppato considerando i sei parametri precedentemente enunciati (ovvero temperatura dell'aria T_a , temperatura media radiante T_r , velocità dell'aria V_a , umidità relativa **RH**, isolamento termico del vestiario I_{cl} e indice metabolico **M** che influenzano l'equazione di bilancio dell'energia $M = C + R + E + P$) e il metodo utilizzato per la valutazione del comfort termico è il **Predicted Mean Vote (PMV)**. Il PMV [1], [2] è un indice che prevede il valore medio dei voti di un ampio gruppo di persone, basato sulla scala di sensazione termica a sette punti riportata di seguito:

Tabella 1. Scala di sensazione termica a sette punti

VOTO	SENSAZIONE TERMICA
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutralità
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Da un punto di vista matematico, Fanger ha stabilito che il PMV può essere espresso mediante la seguente equazione [1]:

$$PMV = [0.028 + 0.303 e^{(-0.036 * M/A)}] L \quad (7)$$

dove L è il carico termico sul corpo, definito come la differenza tra il calore prodotto dal corpo e il calore disperso verso l'ambiente. Quindi, considerando l'equazione del bilancio dell'energia (Eq. 2), L è definito nel modo seguente:

$$L = M - C - R - E - P \quad (8)$$

Quando $L = 0$, l'individuo si trova in condizioni di "neutralità termica" e cioè di benessere. Quando L assume valori positivi, man mano crescenti, vuol dire che si ha una sensazione di caldo sempre più marcata, mentre quando L assume valori negativi, man mano decrescenti, allora si avverte una sensazione di freddo sempre più accentuata.

Gli studi di Fanger hanno condotto anche alla determinazione di un secondo indice denominato **Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)**. Il PPD [1], [2] misura la percentuale di persone la cui sensazione termica non è né neutralità, né leggermente caldo e né leggermente freddo; quindi basandosi sulla scala di sensazione termica ASHRAE a sette punti (Tab.1) [8] tutti coloro che hanno espresso come voto ± 2 e ± 3 sono considerati in una situazione di non comfort mentre tutti coloro che hanno espresso come voto ± 1 e 0 sono considerati in una situazione di comfort. Infatti la scala riportata (Tab 1.) quantifica la sensazione termica provata dagli individui; nello specifico il modello del PMV mette in relazione i sei parametri che caratterizzano il comfort termico con la risposta media delle persone basata su questa scala.

La relazione tra PMV e PPD è definita dalla seguente equazione ed è graficata in Figura 1:

$$PPD = 100 - 95 e^{[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)]} \quad (9)$$

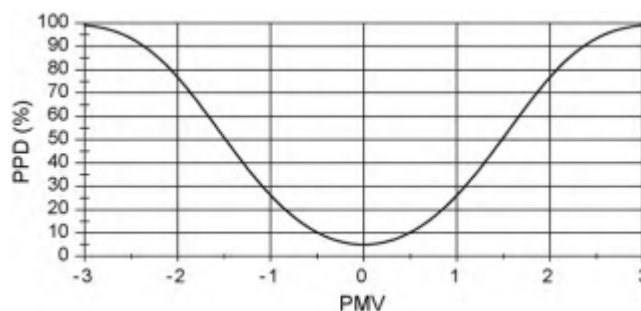


Figura 2. Relazione tra PMV e PPD.

Il grafico (Fig.2) mostra una perfetta simmetria rispetto alla condizione di neutralità (PMV=0); inoltre mostra che anche in condizioni di neutralità ci sono alcuni casi individuali di insoddisfazione con il livello di temperatura, nonostante tutti gli individui abbiano un abbigliamento simile e il livello di attività sia lo stesso. Per la precisione, quando PMV=0 si ha un tasso minimo di insoddisfatti del 5%.

La norma UNI EN ISO 7730 [2] stabilisce tre categorie che permettono la classificazione termica degli ambienti. Esse definiscono i criteri da rispettare, infatti per ogni categoria sono riportati gli intervalli del valore del PMV e la massima percentuale di insoddisfatti che la caratterizzano. Le categorie sono ordinate dalla più confortevole alla meno confortevole come riportato nella Tabella 2:

Tabella 2. Categorie classificazione termica degli ambienti

Categoria	Stato termico complessivo	
	PPD (%)	PMV
Classe A	< 6	-0.2 < PMV < +0.2
Classe B	< 10	-0.5 < PMV < +0.5
Classe C	< 15	-0.7 < PMV < +0.7

1.2.5 MODELLI SEMPLIFICATI PER IL CALCOLO DEL PMV

1. MODELLO DI ROHLES

Il PMV è caratterizzato da una serie di limitazioni e da un ampio numero di parametri necessari per il suo calcolo (temperatura dell'aria T_a , temperatura media radiante T_r , velocità dell'aria V_a , umidità relativa RH , isolamento termico del vestiario I_{cl} e indice metabolico M) che non sono sempre disponibili, specialmente in edifici convenzionali dove solo la temperatura e l'umidità relativa sono spesso monitorati mediante semplici strumenti di misura [3].

Un approccio semplificato è stato sviluppato nel 1971 da Rohles F.H. [4] il cui obiettivo era ottenere un modello per esprimere il PMV utilizzando parametri semplicemente misurabili nell'ambiente, ovvero temperatura dell'aria e umidità relativa. Rohles ha condotto gli esperimenti su 1600 studenti universitari (800 uomini e 800 donne) in camere climatiche, chiedendo loro di valutare le sensazioni termiche basandosi sulla scala a sette punti (i cui voti sono compresi tra i valori +3 e -3).

I risultati dello studio hanno condotto alla determinazione del PMV in una forma semplificata secondo la funzione $PMV = aT_a + bP_v - c$ dove:

- T_a è la temperatura dell'aria (°C)
- P_v è la pressione di vapore acqueo (kPa) che dipende dall'umidità relativa RH secondo la relazione $P_v = (RH * P_s) / 100$ in cui P_s è la pressione di vapore saturo

- a, b, c sono coefficienti sperimentali determinati per esposizione temporale di un'ora e i loro valori sono rispettivamente **a=0.245**, **b=0.248**, **c=6.475**

Il modello è caratterizzato dai seguenti limiti:

- È riferito esclusivamente ad attività sedentarie ($M=1.2$ met)
- È valido solo per un valore di isolamento termico del vestiario ($I_{cl}=0.6$)
- È valido solo per valori di velocità dell'aria $V_a < 0.2$ m/s
- È stato realizzato considerando esposizioni temporali di 1, 2 e 3 ore

2. MODELLO DI BURATTI ET AL.

Nel 2012 Buratti ha utilizzato dati sperimentali provenienti da edifici con sistemi di Heating, Ventilation and Air Conditioning (sistemi HVAC) per aggiornare l'equazione di Rohles ed estendere il modello ad altri intervalli di isolamento termico del vestiario (I_{cl}), poiché tale modello è valido solo per $I_{cl}=0.6$. I dati a cui si fa riferimento derivano da 463 misure strumentali e da oltre 1100 sondaggi tramite questionari in ambienti caratterizzati da attività sedentarie; questi sono stati raccolti in stagioni differenti in aule universitarie, banche, uffici universitari e uffici con 1-3 occupanti.

Mediante le misure strumentali sono stati misurati i seguenti parametri:

- Temperatura a bulbo secco dell'aria forzata
- Temperatura a bulbo umido dell'aria forzata
- Temperatura globotermometrica, usata per calcolare la Temperatura media radiante
- Velocità media dell'aria
- Temperatura a livello della caviglia (0.1 m dal pavimento)

Per mezzo di questi parametri sono stati calcolati:

- L'umidità relativa
- Il Predicted Mean Vote Pote (PMV)
- Il Predicted Percentage of Dissatisfied PPD

Oltre alle misure interne sono state effettuate anche delle misure esterne che hanno permesso di determinare:

- L'umidità relativa esterna
- La temperatura esterna

Mediante i sondaggi tramite questionari, suddivisi in tre parti, sono stati richieste le seguenti informazioni.

- Prima parte: età, sesso
- Seconda parte: questionario termico (attività svolta negli ultimi 10, 20, 30 e 60 minuti; opinioni sulla tollerabilità dell'ambiente termico, movimento dell'aria, differenza di temperatura tra testa e caviglia, possibili preferenze per diverse condizioni)

- Terza parte: controllo ambientale personale (possibilità di interazione con le condizioni microclimatiche ambientali, attraverso l'apertura di porte e finestre ecc...; posizione nella stanza)

I dati riguardanti l'isolamento termico del vestiario sono stati raccolti durante tutti i sondaggi per mezzo di questionari e cadono in un intervallo **0.25-1.65 clo**. Essi sono stati raggruppati in tre intervalli, indipendentemente dalla stagione, ovvero **0.25-0.50 clo**, **0.51-1.00 clo**, **1.01-1.65 clo** che rappresentano rispettivamente basse, intermedie e alte condizioni di isolamento termico del vestiario. Per ognuno di questi tre intervalli sono stati calcolati i nuovi coefficienti **a**, **b**, **c** dell'equazione di Rohles ($PMV = aT_a + bP_v - c$), riportati nella tabella seguente:

Tabella 3. Coefficienti a, b, c dell'equazione di Rohles aggiornati

I_{cl}	a	b	c
0.25-0.50	0.2803	0.1717	7.1383
0.51-1.00	0.1383	0.0269	3.0190
1.01-1.65	0.1478	-0.1371	2.5239

1.2.6 LIMITI DELLO STATO DELL'ARTE

Il modello per il calcolo del PMV è stato realizzato attraverso studi condotti in laboratorio, per questo quando viene applicato in condizioni reali presenta delle limitazioni:

1. È stato ideato per prevedere il comfort termico medio di un ampio gruppo di utenti, quindi non sempre riesce a rappresentare il comfort di una popolazione
2. È difficile valutare l'esatto valore delle variabili in input nonostante esistano norme che specifichino come le quantità per la valutazione del PMV debbano essere misurate; in particolare l'indice metabolico può variare durante la giornata e l'isolamento termico del vestiario può non essere costante nel tempo
3. Non tutti i sei parametri necessari per il suo calcolo sono sempre disponibili a causa della strumentazione richiesta dalle normative di riferimento (temperatura dell'aria T_a , temperatura media radiante T_r , velocità dell'aria V_a , umidità relativa **RH**, isolamento termico del vestiario I_{cl} e indice metabolico **M**)

Per questo motivi Rohles F.H. [4] ha condotto degli studi per poter semplificare l'equazione per il calcolo del PMV in modo da renderla funzione di parametri facilmente misurabili, ovvero temperatura dell'aria T_a e umidità relativa **RH**. L'equazione determinata è $PMV = aT_a + bP_v - c$, valida solo per $I_{cl}=0.6$ per il quale sono stati determinati i coefficienti **a=0.245**, **b=0.248**, **c=6.475**. Buratti ha ampliato l'applicazione dell'equazione, determinando tre intervalli I_{cl} e calcolando per ognuno di essi i nuovi coefficienti **a**, **b**, **c** come riportato in Tabella 3.

A partire da questi due modelli, l'obiettivo di questo studio è minimizzare l'errore tra il modello aggiornato di Buratti et al. e il modello presente sulla norma UNI EN ISO 7730 [2], calcolando nuovi coefficienti a, b, c dell'equazione; per fare questo sono stati utilizzati sei modelli di ottimizzazione (**Nelder-Mead**, **BFGS**, **Newton-CG**, **Trust-NCG**, **Trust-Krylov**, **Trust-Exact**),

implementati con il linguaggio Python, in modo da determinare i coefficienti a , b , c per ognuno dei tre intervalli I_{α} definiti da Buratti per le diverse zone climatiche in cui è suddivisa l'Europa in modo da rendere il modello applicabile a tutti quei Paesi presenti in tali zone climatiche. Infatti, nello studio citato [5], questa suddivisione non è stata considerata.

2. MATERIALI E METODI

Questo capitolo è dedicato alla descrizione della metodologia impiegata per ottimizzare il modello semplificato per il calcolo del PMV presente in letteratura [5]; l'ottimizzazione, come precedentemente accennato, consiste nella determinazione di nuovi coefficienti a , b , c dell'Equazione 1. Nello specifico, i coefficienti saranno calcolati in modo da tenere in considerazione le diverse zone climatiche europee perché in questo modo il modello può essere applicato a tutte le Nazioni situate in tali zone; è quindi un'espansione del modello di Buratti et al. poiché, nel loro studio, questa suddivisione non è stata presa in considerazione. La metodologia seguita può essere sintetizzata nelle fasi riportate di seguito e descritte dettagliatamente nei paragrafi successivi:

1. Selezione ed analisi del database contenente i dati utilizzati nello studio,
2. Analisi dati e creazione dei dataset finali impiegati per lo sviluppo dei modelli di ottimizzazione,
3. Implementazione di sei modelli di ottimizzazione,
4. Calcolo performance dei modelli e loro validazione mediante le metriche MAE e MSE,
5. Selezione del miglior modello di ottimizzazione tra i sei analizzati.

2.1 SELEZIONE DEL DATABASE

I dati utilizzati nel seguente studio sono raccolti nel database “**ASHRAE Global Thermal Comfort Database II**” presente sul sito GitHub [9], sul quale è stato caricato dal sito ufficiale ASHRAE. Esso combina una serie di misurazioni ambientali indoor con valutazioni soggettive degli occupanti degli edifici di tutto il mondo. Nello specifico, il database è suddiviso in due parti denominate **db_metadata** e **db_measurements**:

- **db_metadata** → questa porzione presenta informazioni descrittive come:
 - **building_id**: identificatore univoco dell'edificio, rappresentato da un numero intero)
 - **region**: continente dove è stato realizzato lo studio
 - **country**: nazione dove è stato realizzato lo studio
- **db_measurements** → in questa parte del database sono presenti le misurazioni ambientali e le valutazioni soggettive degli occupanti degli edifici. Tra le **misurazioni ambientali** riportate le più rilevanti per lo scopo del lavoro sono:
 - **timestamp**: data in cui è stata effettuata la misurazione, nel formato anno-mese-giorno
 - **ta**: temperatura dell'aria misurata nella zona occupata [°C]
 - **tr**: temperatura media radiante misurata nella zona occupata [°C],
 - **rh**: umidità relativa [%]
 - **vel**: temperatura dell'aria misurata nella zona occupata [m/s]
 - **met**: tasso metabolico medio del soggetto [met]
 - **clo**: isolamento termico del vestiario del soggetto [clo]
 - **t_out**: (temperatura dell'aria esterna [°C])

- **pmv**: Predicted Mean Vote o Voto Medio Previsto, calcolato secondo la norma UNI EN ISO 7730

Per quanto riguarda le valutazioni soggettive, invece, il database presenta i seguenti parametri:

- **thermal_sensation**: voto basato sulla scala di sensazione termica a sette punti, con valori compresi tra -3, che indica la sensazione di freddo, e +3, che indica la sensazione di caldo;
- **thermal_acceptability**: accettabilità termica, cioè se risulta accettabile o inaccettabile;
- **thermal_preference**: preferenza termica, cioè più fresco, uguale, più caldo;
- **air_movement_acceptability**: accettabilità del movimento dell'aria, cioè se risulta accettabile o inaccettabile;
- **air_movement_preference**: preferenza del movimento dell'aria, cioè minore, uguale, maggiore.

2.2 ANALISI DEI DATI E CREAZIONE DEI DATASET

Il **db_metadata** e il **db_measurements** sono file in formato Comma Separated Values o Valori Separati da Virgola (CSV) che è possibile aprire mediante Microsoft Excel. Questo formato permette di organizzare i dati in tabelle poiché ogni riga del file e ogni valore separato dalla virgola rappresentano rispettivamente le righe e le colonne delle tabelle. I due file si presentano nel modo seguente (Fig. 3):

	A	B	C	D	E	F	G
1	building_id	building_id_inf	contributor	publication	region	country	city
2	1,no	David Rowe	NA	oceania	australia	sydney	-33.8688197,151.2092955
3	2,no	David Rowe	NA	oceania	australia	sydney	-33.8688197,151.2092955
4	3,no	Fred Baumann	NA	americas	usa	grand rapids	42.9633599,-85.668088
5	4,no	David Rowe	NA	oceania	australia	sydney	-33.8688197,151.2092955
6	5,no	Gail Brager	"Benton, C. C. & Brager, G. S.	Advanced Customer Techn			

(a)

	A	B	C	D	E	F	G
1	index	record_id	building_id	timestamp	season	subject_id	age
2	0,1,1	1995-05-18T00:00:00Z	winter	10	NA	female	NA,NA,22.3,NA,22.3,NA
3	1,2,1	1995-05-18T00:00:00Z	winter	14	NA	female	NA,NA,23,NA,23,NA,23
4	2,3,1	1995-05-18T00:00:00Z	winter	15	NA	female	NA,NA,22,NA,22,NA,22
5	3,4,1	1995-05-18T00:00:00Z	winter	17	NA	female	NA,NA,23.2,NA,23.2,NA
6	4,5,1	1995-05-18T00:00:00Z	winter	21	NA	male	NA,NA,22.2,NA,22.2,NA,2

(b)

Figura 3. File CSV db_metadata (a) e db_measurements (b).

Per utilizzare ed analizzare i dati forniti dal database ASHRAE Global Thermal Comfort Database II, è stato utilizzato il linguaggio di programmazione Python e le sue librerie specifiche (Pandas, NumPy, Matplotlib, ecc.). Come prima azione, sono stati importati i file CSV (Fig. 2) come dataframes all'interno dell'ambiente di sviluppo integrato (IDE) Spyder. Tali dataframes sono riportati in Figura 4.

index	building_id	building_id_inf	contributor	publication	region	country	city	lat	lon	climate	building_type	cooling_type	year
4	5	no	Gail Brager	Benton, C. C. & Brage...	americas	usa	auburn	32.6899	-85.4888	mediterranean	office	air conditioned	1993
5	6	no	Gail Brager	Benton, C. C. and Bra...	americas	usa	san ramon	37.7644	-121.954	mediterranean	office	air conditioned	1993
6	7	no	Gail Brager	Benton, C. C. and Bra...	americas	usa	san ramon	37.7644	-121.954	mediterranean	office	air conditioned	1991
7	8	no	Gail Brager	Benton, C. C. and Bra...	americas	usa	san ramon	37.7644	-121.954	mediterranean	office	air conditioned	1992
8	9	no	Gail Brager	Benton, C. et al. Adv...	americas	usa	antioch	38.0049	-121.806	mediterranean	office	air conditioned	1995
9	10	no	Jill Brown	Brown, J. C. (1995). ...	europa	uk	south wales	51.6858	-3.38214	west coast marine	office	air conditioned	1992
10	11	no	Jill Brown	Brown, J. C. (1995). ...	europa	uk	south wales	51.6858	-3.38214	west coast marine	office	air conditioned	1992
11	12	no	Jill Brown	Brown, J. C. (1995). ...	europa	uk	south wales	51.6858	-3.38214	west coast marine	office	air conditioned	1992
12	13	no	Jill Brown	Brown, J. C. (1995). ...	europa	uk	south wales	51.6858	-3.38214	west coast marine	office	air conditioned	1993
13	14	no	Jill Brown	Brown, J. C. (1995). ...	europa	uk	south wales	51.6858	-3.38214	west coast marine	office	air conditioned	1992
14	15	no	Jill Brown	Brown, J. C. (1995). ...	europa	uk	south wales	51.6858	-3.38214	west coast marine	office	air conditioned	1993
15	16	no	Jill Brown	Brown, J. C. (1995). ...	europa	uk	south wales	51.6858	-3.38214	west coast marine	office	air conditioned	1993
16	17	no	Jill Brown	Brown, J. C. (1995). ...	europa	uk	south wales	51.6858	-3.38214	west coast marine	office	air conditioned	1993

(a)

index	index	record_id	building_id	timestamp	season	subject_id	age	gender	ht	wt	ta	ta_h	ta_m	ta_l	top	tr	tg	tg_h
0	0	1	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	10	nan	female	nan	nan	22.3	nan	22.3	nan	22.625	22.95	nan	nan
1	1	2	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	14	nan	female	nan	nan	23	nan	23	nan	23.5671	24.1343	nan	nan
2	2	3	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	15	nan	female	nan	nan	22	nan	22	nan	22.0457	22.0914	nan	nan
3	3	4	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	17	nan	female	nan	nan	23.2	nan	23.2	nan	23.7652	24.3303	nan	nan
4	4	5	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	21	nan	male	nan	nan	22.2	nan	22.2	nan	22.6386	23.0771	nan	nan
5	5	6	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	22	nan	male	nan	nan	21.2	nan	21.2	nan	21.1201	21.0402	nan	nan
6	6	7	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	4	nan	male	nan	nan	21.9	nan	21.9	nan	22.1343	22.3686	nan	nan
7	7	8	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	7	nan	male	nan	nan	21.4	nan	21.4	nan	21.5795	21.7591	nan	nan
8	8	9	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	8	nan	male	nan	nan	21.6	nan	21.6	nan	22.2514	22.9029	nan	nan
9	9	10	1	1995-05-18 00:00:00+00:00	winter	9	nan	male	nan	nan	21.3	nan	21.3	nan	21.1143	20.9286	nan	nan
10	10	11	1	1995-05-19 00:00:00+00:00	winter	16	nan	female	nan	nan	21.8	nan	21.8	nan	22.365	22.93	nan	nan
11	11	12	1	1995-05-19 00:00:00+00:00	winter	24	nan	male	nan	nan	21.5	nan	21.5	nan	21.5689	21.6379	nan	nan
12	12	13	1	1995-05-19 00:00:00+00:00	winter	25	nan	male	nan	nan	22.8	nan	22.8	nan	23.2182	23.6364	nan	nan

(b)

Figura 4. Tabelle “db_metadata” (a) e “db_measurements” (b) realizzate con linguaggio di programmazione Python

Una volta importati i file, sono state selezionate cinque nazioni europee situate in zone climatiche differenti, secondo la classificazione dei climi di Köppen [10]. I paesi scelti sono i seguenti: Svezia, Regno Unito, Portogallo, Grecia e Francia.

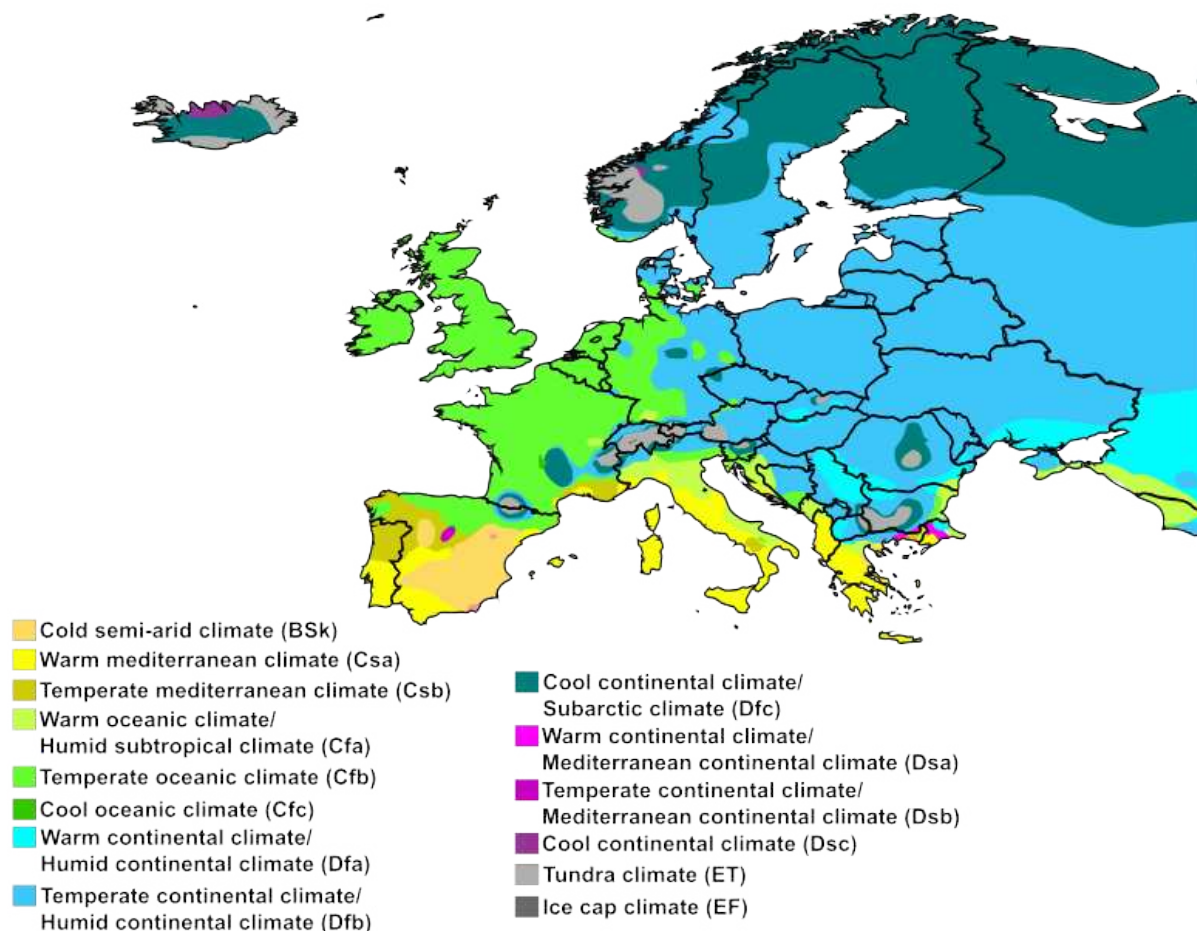


Figura 5. Climi in Europa secondo la classificazione di Köppen [10]

Per selezionare i dati ambientali relativi alle nazioni di interesse dalla tabella iniziale **db_measurements** (Fig. 4b), è stata analizzata la tabella **db_metadata** (Fig. 4a). Infatti, entrambe le tabelle presentano la colonna “building_id” che ha guidato la selezione dei dati ambientali di interesse. Nello specifico, **db_metadata** è stato filtrato selezionando dalla colonna “region”, le righe contenenti le stringhe “portugal”, “sweden”, “uk”, “greece”, “france”. Una volta ridotta la tabella db_metadata al numero di righe d’interesse, sono stati analizzati i valori relativi alla colonna “building_id”. Successivamente, dalla tabella **db_measurements** sono state selezionate solo le righe relative ai “building_id” citati in precedenza. In Figura 6, si riporta a titolo di esempio il caso del Portogallo.

Index	building_id	building_id_inf	contributor	publication	region	country	city	lat	lon	climate	building_type	cooling_type
758	759	yes	John Stoops	Stoops, J. L.The thermal envir...	europe	portugal	lisbon	38.7223	-9.13934	hot-summer mediterranean	others	naturally ventilated
759	760	yes	John Stoops	Stoops, J. L.The thermal envir...	europe	portugal	lisbon	38.7223	-9.13934	hot-summer mediterranean	others	naturally ventilated
760	761	yes	John Stoops	Stoops, J. L.The thermal envir...	europe	portugal	porto	41.1579	-8.62911	warm-summer mediterranean	office	naturally ventilated
761	762	yes	John Stoops	Stoops, J. L.The thermal envir...	europe	portugal	porto	41.1579	-8.62911	warm-summer mediterranean	others	mixed mode
762	763	yes	John Stoops	Stoops, J. L.The thermal envir...	europe	portugal	porto	41.1579	-8.62911	warm-summer mediterranean	office	naturally ventilated
763	764	yes	John Stoops	Stoops, J. L.The thermal envir...	europe	portugal	porto	41.1579	-8.62911	warm-summer mediterranean	others	mixed mode

Figura 6. “db_metadata” Portogallo

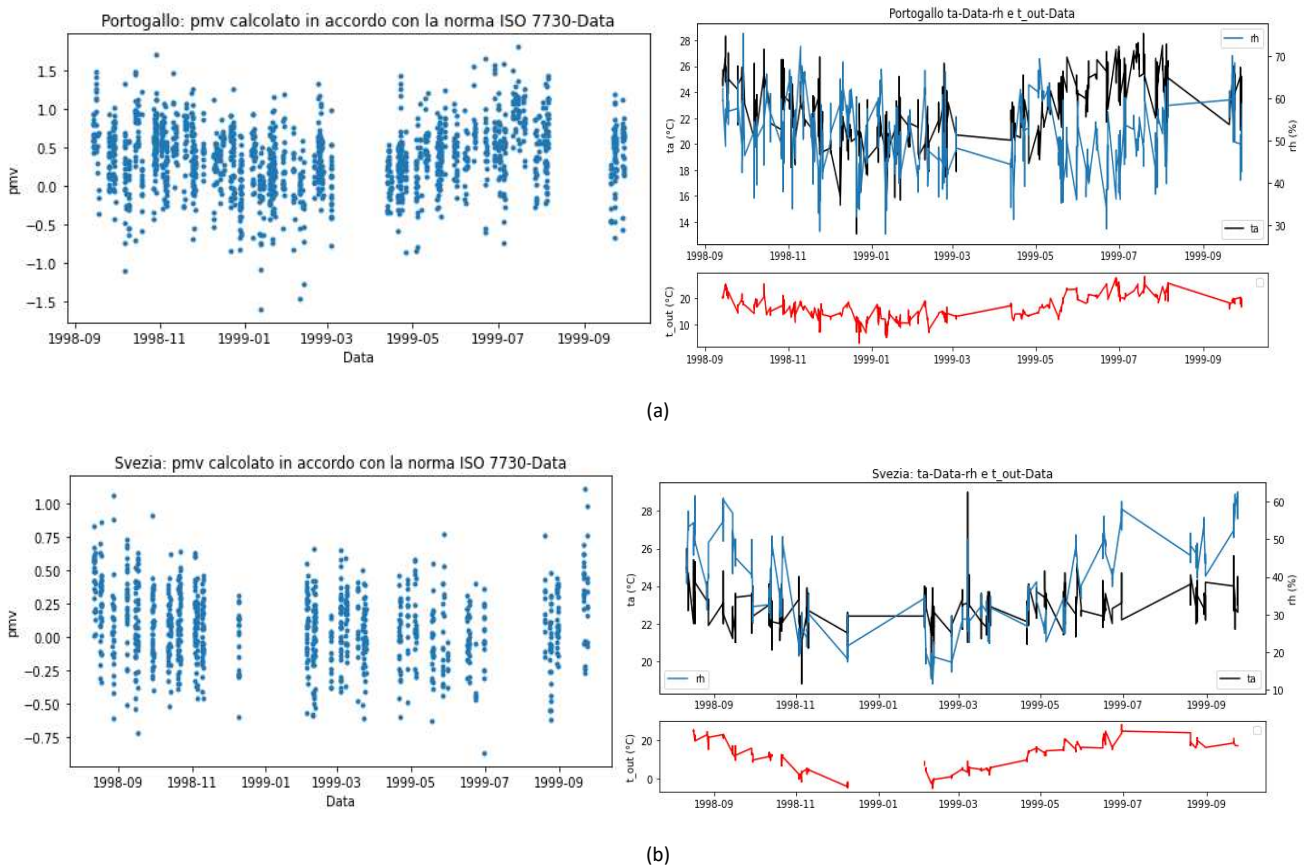
La fase successiva ha previsto la selezione delle colonne relative ai parametri ambientali utili al raggiungimento degli obiettivi del seguente lavoro. In particolare, sono state selezionate le seguenti colonne: building_id, timestamp, season, ta, tr, rh, vel, met, clo, t_out, pmv.

Il risultato di queste operazioni è una tabella per ogni paese selezionato, strutturato come riportato in Figura 7.

Index	building_id	timestamp	season	ta	tr	rh	vel	met	clo	t_out	pmv
0	761	1998-09-14 00:00:00+00:00	summer	25.7	27.3	62.3	0	1.5	0.63	20.4	0.92
1	761	1998-09-14 00:00:00+00:00	summer	25.4	27.1	61.7	0	1.2	0.7	20.4	0.85
2	761	1998-09-14 00:00:00+00:00	summer	25.4	26.8	59.4	0	1.3	0.68	20.2	0.8
3	761	1998-09-14 00:00:00+00:00	summer	25.3	27	59.5	0	1.4	0.64	20.2	0.79
4	761	1998-09-14 00:00:00+00:00	summer	25.1	27.3	60.4	0.1	1.4	0.56	20.2	0.5
5	761	1998-09-14 00:00:00+00:00	summer	24.6	27.5	60.7	0.1	1.2	0.75	20.2	0.66

Figura 7. "db_measurements" Portogallo

Una volta ottenute le tabelle menzionate in precedenza, è stato possibile svolgere l'analisi dati relativa ai parametri ambientali riportati in Fig. 7 e descritti nei paragrafi precedenti (Paragrafo 2.1). Come primo step, sono stati graficati i parametri ambientali riportati in Figura 7.



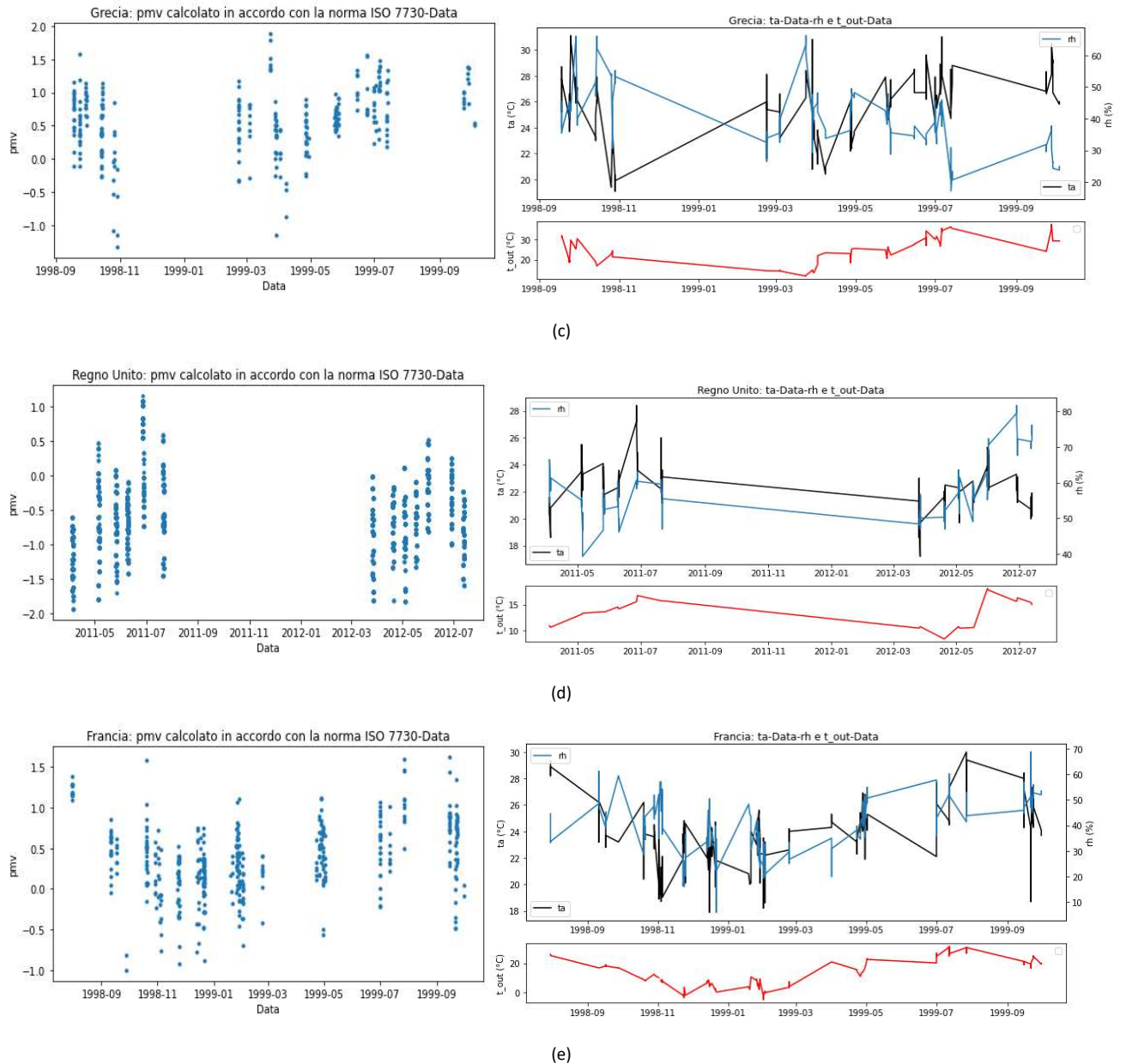


Figura 8. Grafici trend dei parametri selezionati: Portogallo (a), Svezia (b), Grecia (c), Regno Unito (d), Francia (e)

I grafici riportati evidenziano la coerenza dei trend di temperatura dell'aria misurata nella zona occupata (**ta**) e la temperatura dell'aria esterna (**t_out**) poiché questa, inevitabilmente, influenza la temperatura interna negli edifici; vi è di conseguenza anche una correlazione tra la temperatura interna (**ta**) e il **pmv** che, difatti, sono caratterizzati dallo stesso andamento.

Un'ulteriore osservazione che è possibile evincere dai grafici in Figura 7, riguarda la presenza di "NaN values", che possono indicare la mancanza di dati nei periodi di acquisizione riportati nei dataframe o la presenza di periodi temporali in cui non sono state affatto eseguite le misurazioni. Poiché i "nan values" possono influenzare negativamente i risultati, sono state svolte le seguenti operazioni:

- Se il numero di “NaN values” era elevato, le righe contenenti i dati mancanti sono state eliminate. Un esempio è riportato in Figura 9a;
- Nel caso in cui la loro presenza sia sporadica, il dato mancante è stato sostituito con la media tra il valore precedente e successivo (Figura 9b).

310	750	1999-10-08 00:00:00+00:00	summer	27.7	28.1	nan	0	1.2	0.68	31.4	nan	nan
311	750	1999-10-08 00:00:00+00:00	summer	27.2	28.3	nan	0	1.7	0.55	31.4	nan	nan
312	750	1999-10-08 00:00:00+00:00	summer	28.4	27.7	nan	0.1	1.2	0.66	31.4	nan	nan
313	750	1999-10-08 00:00:00+00:00	summer	27.3	28.7	nan	0.1	1.2	0.65	31.4	nan	nan
314	750	1999-10-08 00:00:00+00:00	summer	28.4	29.3	nan	0	1.2	0.6	31.4	nan	nan
315	750	1999-10-08 00:00:00+00:00	summer	29.6	27.7	nan	0.1	1.2	0.66	31.4	nan	nan

(a)

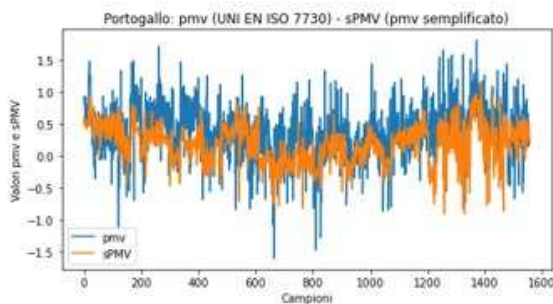
23.6	25.7	46.8	0.04	1.5	0.47	16.8	0.04	0.02	23.6	25.7	46.8	0.04	1.5	0.47	16.8	0.04	0.02
22.5	nan	42.6	0	1.2	0.78	16.8	nan	nan	22.5	24.45	42.6	0	1.2	0.78	16.8	-0.23	-0.24
22	23.2	51.1	0.02	1.2	0.56	16.8	-0.5	-0.5	22	23.2	51.1	0.02	1.2	0.56	16.8	-0.5	-0.5

(b)

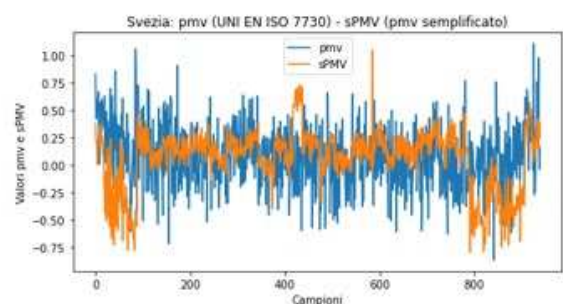
Figura 9. Eliminazione “nan values” (a), sostituzione “nan values” (b)

Terminato il filtraggio dei dati, si passa al calcolo del PMV semplificato utilizzando i coefficienti determinati da Buratti et al. [5]. Il PMV semplificato è stato calcolato per tutte le nazioni d’interesse ed è stato confrontato con il PMV standard fornito dal database citato in precedenza. Figura 10 mostra gli andamenti elaborati per tutte le nazioni d’interesse ed è possibile notare delle differenze tra il comfort calcolato con il modello semplificato e quello standard. Per la precisione le differenze riguardano i valori assunti dal PMV nei due modelli, evidenziati dalla diversità tra i due andamenti.

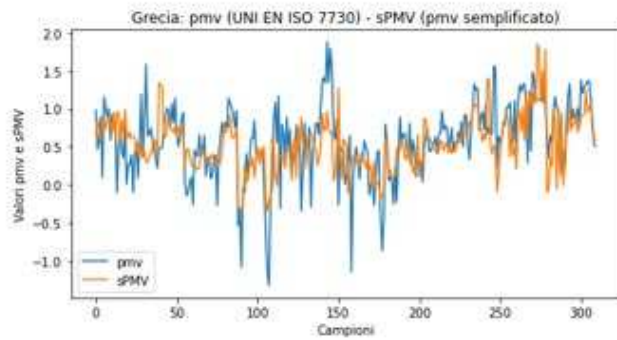
I grafici di confronto ottenuti, per ciascuna Nazione, sono:



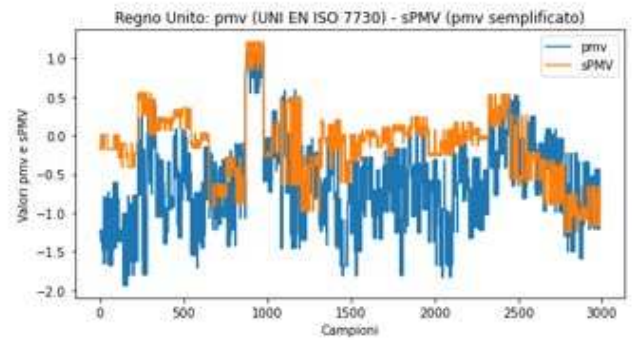
(a)



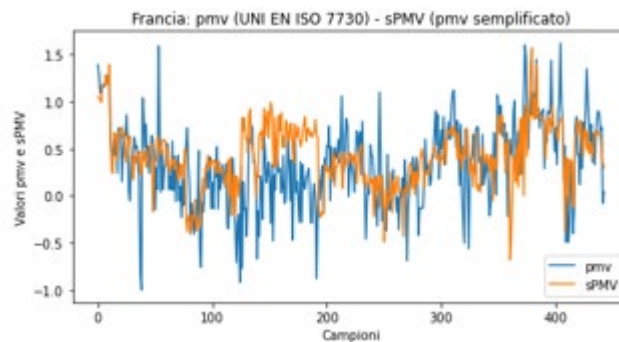
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 10. Grafici di confronto tra PMV semplificato e PMV (UNI EN ISO 7730): Portogallo (a), Svezia (b), Grecia (c), Regno Unito (d), Francia (e)

I grafici evidenziano le differenze che si hanno tra il PMV semplificato e il PMV standard, cioè mettono in risalto il divario tra i due modelli; questo rappresenta il punto di partenza del presente lavoro di tesi, il cui obiettivo è ottimizzare il modello aggiornato in modo da minimizzare l'errore tra i due modelli citati.

2.3 MODELLI DI OTTIMIZZAZIONE

La metodologia seguita per l'ottimizzazione è basata sull'analisi dell'articolo di Zhang et al. [11] nel quale è proposto un metodo per il miglioramento del PMV. Esso è basato sull'utilizzo dell'algoritmo di ottimizzazione Variable Metric Algorithm, il quale minimizza la deviazione tra il PMV e il Thermal Sensation Vote (TSV) fornendo in input all'algoritmo la seguente equazione:

$$e = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (PMV_i - TSV_i)^2 \quad (10)$$

Poiché l'obiettivo del presente lavoro è ottimizzare i coefficienti **a**, **b**, **c** dell'equazione per il calcolo del PMV semplificato ($sPMV = aT_a + bP_v - c$), in modo da ridurre la deviazione tra il PMV calcolato con la norma UNI EN ISO 7730 e il PMV semplificato stesso (sPMV), si procede con l'applicazione del "Variable Metric Algorithm" fornendo in input l'equazione seguente:

$$e = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (PMV_i - sPMV_i)^2 \quad \rightarrow \quad e = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [PMV_i - (a * T_a + b * P_v - c)]^2 \quad (11)$$

In questo modo l'algoritmo di ottimizzazione calcola i valori **a**, **b**, **c** dell'equazione (11) in modo da minimizzare l'errore tra PMV e sPMV.

Il "Variable Metric Algorithm" basa il suo funzionamento sui metodi di ottimizzazione quasi-Newton; l'analisi però è stata estesa anche ad altri cinque modelli di ottimizzazione caratterizzati dallo stesso input, ovvero l'equazione definita precedentemente (11). Quindi, lo studio è stato condotto utilizzando in totale sei modelli di ottimizzazione:

- Nelder-Mead
- BFGS (Broyden – Fletcher – Goldfarb – Shanno) → Metodo quasi-Newton
- Newton Conjugate-Gradient
- Trust-Newton Conjugate-Gradient
- Trust-Krylov
- Trust-Exact

L'obiettivo comune di tali modelli è determinare il **minimo di una funzione**. Ciascun modello di ottimizzazione è stato implementato utilizzando il linguaggio di programmazione Python [12] ed è stato adoperato per calcolare i coefficienti **a**, **b**, **c** per tutte le Nazioni selezionate.

Come precedentemente accennato, l'equazione (11) costituisce l'input per ciascun modello utilizzato, ma in particolare:

1. Il modello Nelder-Mead richiede in input solo l'equazione.
2. Il modello BFGS richiede in input sia l'equazione che la relativa matrice Jacobiana.
3. I modelli Newton Conjugate-Gradient, Trust-Newton Conjugate-Gradient, Trust-Krylov, Trust-Exact richiedono in input l'equazione, la relativa matrice Jacobiana e la relativa matrice Hessiana.

I modelli impiegati in questo studio sono descritti nei paragrafi successivi.

Nelder-Mead

Il modello Nelder-Mead è un metodo di ricerca diretta e si basa sul concetto di semplice, un particolare tipo di politopo (ovvero uno spazio n dimensionale) con n+1 vertici in uno spazio ad n dimensioni. Ad esempio, un semplice è un triangolo nel piano, un tetraedro nello spazio, ecc. [13]

I punti sono ordinati secondo il valore della funzione nei vertici del semplice:

$$f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{n+1}) \quad (12)$$

Sia *c* il centroide del semplice creato dagli *n* punti migliori:

$$c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

Utilizzando *c* viene generato un punto x_t che sostituisca il punto peggiore:

$$x_t = c + \alpha(c - x_{n+1}) \quad (14)$$

in cui $\alpha > 0$ è un parametro.

Se il nuovo punto x_t non è né il punto migliore né il peggiore, $f(x_1) \leq f(x_t) \leq f(x_n)$, allora x_t sostituisce x_{n+1} .

Se il nuovo punto x_t è il punto migliore, $f(x_t) \leq f(x_1)$, viene calcolato un altro punto

$$x_e = c + \beta(c - x_n + 1) \quad (15)$$

in cui $\beta > 1$ è un parametro per espandere il semplice. Se $f(x_e) \leq f(x_t)$, allora $f(x_{n+1})$ viene sostituita da x_e , altrimenti da x_t .

Se il nuovo punto x_t è il secondo punto peggiore, $f(x_t) \geq f(x_n)$ il semplice viene considerato troppo grande e necessita di essere contratto. È definito un nuovo punto di prova:

$$x_c = \begin{cases} c + \gamma(x_{n+1} - c), & \text{se } f(x_t) \geq f(x_{n+1}) \\ c + \gamma(x_t - c), & \text{se } f(x_t) < f(x_{n+1}) \end{cases} \quad (16)$$

in cui $0 < \gamma < 1$ rappresenta un parametro. Se $f(x_c) < \min(f(x_{n+1}), f(x_t))$, allora x_c sostituisce x_{n+1} , altrimenti viene effettuata una nuova contrazione. Il processo è iterativo e ad ogni iterazione si sostituisce il punto peggiore del semplice, determinando così la formazione di un nuovo semplice. Il processo giunge a convergenza una volta raggiunto un parametro di tolleranza prefissato; ciò vuol dire che il semplice, al diminuire della tolleranza, diventa sempre più piccolo e quindi i valori della funzione ai vertici del semplice diventano sempre più simili. Il semplice determina così il minimo della funzione [14].

BFGS (Broyden – Fletcher – Goldfarb – Shanno)

Il modello BFGS [15] è un metodo iterativo costituito dai seguenti passaggi:

1. Si fornisce in input il punto iniziale x_0 (ovvero il punto iniziale dal quale l'algoritmo comincia la minimizzazione della funzione). La matrice Hessiana iniziale considerata è la matrice identità $B_0 = I$; poiché il modello utilizza la matrice Hessiana inversa H_0 , l'inversa della matrice identità è la matrice identità stessa, quindi $H_0 = I$.

Partendo da x_0 e H_0 , i successivi step saranno ripetuti perché il modello ad ogni iterazione aggiorna x_k fino a quando perviene alla soluzione ottimale, che corrisponde al minimo della funzione. Il modello:

2. Determina la direzione di ricerca (direzione di discesa) p_k risolvendo $p_k = -H_k \nabla f(x_k)$
3. Esegue un'ottimizzazione unidimensionale per determinare un'accettabile dimensione del passo α_k nella direzione trovata nel secondo step. α_k è determinato mediante la relazione $\alpha_k = \arg \min f(x_k + \alpha p_k)$
4. Calcola $s_k = \alpha_k p_k$ e determina $x_{k+1} = x_k + s_k$
5. Calcola $y_k = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k)$
6. Determina $H_{k+1} = H_k + \frac{(s_k^T y_k + y_k^T H_k y_k)(s_k s_k^T)}{(s_k^T y_k)^2} - \frac{H_k y_k s_k^T + s_k y_k^T H_k}{s_k^T y_k}$
ovvero l'approssimazione dell'inversa della matrice Hessiana

Newton Conjugate-Gradient

Il modello Newton-CG è basato sul modello di Newton. Data una funzione due volte differenziabile, il modello di Newton [16] determina il minimo della funzione costruendo una successione di punti x_k (x_0, x_1, x_2, \dots) che dal valore iniziale x_0 converge verso il minimo della funzione x_* . Per fare questo il modello minimizza ad ogni passo l'approssimazione quadratica della funzione f di seguito riportata:

$$f(x_k + t) \approx f(x_k) + f'(x_k)t + \frac{1}{2}f''(x_k)t^2$$

L'iterazione successiva x_{k+1} è definita in modo da minimizzare l'approssimazione quadratica in t e fissando $x_{k+1} = x_k + t$. Se la derivata seconda è positiva, l'approssimazione quadratica è una funzione convessa di t , e il suo minimo può essere trovato imponendo la derivata uguale a 0, cioè

$$0 = \frac{d}{dt} \left[f(x_k) + f'(x_k)t + \frac{1}{2}f''(x_k)t^2 \right] = f'(x_k) + f''(x_k)t$$

e si raggiunge il minimo per

$$t = -\frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}$$

Quindi il metodo di Newton esegue l'iterazione

$$x_{k+1} = x_k + t = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)} = x_k - f''(x_k)^{-1}f'(x_k)$$

fino a raggiungere il minimo x_* . $f'(x_k)$ e $f''(x_k)$ rappresentano rispettivamente il gradiente e la matrice Hessiana.

In questa forma semplice tuttavia ($x_{k+1} = x_k + t$), la convergenza del metodo di Newton non è garantita. Per questo motivo viene utilizzato il metodo Newton-CG (dove CG significa Conjugate Gradient) che adopera il metodo dei gradienti coniugati per risolvere il sistema lineare [17] in modo iterativo così da evitare l'inversione esplicita della matrice hessiana.

$$f''(x_k)t = -f'(x_k)$$

Modelli Trust-Region (Trust-Newton CG, Trust-Krylov, Trust-Exact)

I modelli Trust-Newton, Trust-Krylov e Trust-Exact appartengono alla famiglia dei modelli Trust-Region [18]; questi generano una successione di punti basandosi su un modello quadratico della funzione obiettivo. I metodi Trust-Region definiscono una regione intorno al punto corrente x_k in cui hanno "confidenza" che il modello quadratico sia una buona approssimazione della funzione obiettivo, e scelgono la direzione in modo tale da ottenere una buona approssimazione del punto di minimo all'interno della regione di confidenza. La regione di confidenza, di solito, è costituita da una sfera di raggio dato, il quale determina il passo di spostamento. Quindi, i metodi Trust-Region scelgono contemporaneamente la direzione e il passo di spostamento. Se un passo

non è accettabile, viene ridotta la dimensione della regione di confidenza e si cerca un nuovo minimo all'interno della nuova regione di confidenza. In generale, la direzione cambia tutte le volte che cambia la dimensione della regione di confidenza.

Se la regione è troppo piccola, l'algoritmo potrebbe non riuscire a muoversi con efficacia verso il punto di minimo locale della funzione obiettivo f . Se la regione è troppo grande, il minimo del modello quadratico $m_k(p)$ può essere molto lontano dal vero minimo della funzione obiettivo che si sta minimizzando, e quindi è necessario ridurre la regione di confidenza e minimizzare nuovamente il modello quadratico. Nelle implementazioni dei metodi Trust-Region, la dimensione della regione di confidenza viene scelta tenendo conto di come si è comportato l'algoritmo nelle iterazioni precedenti. Se il modello è affidabile, ovvero se produce dei buoni passi di spostamento e se predice con una buona approssimazione il comportamento della funzione obiettivo, allora la dimensione della regione di confidenza continua ad aumentare per poter consentire all'algoritmo di effettuare dei passi sempre più significativi. Se ad una certa iterazione il passo scelto non permette di ridurre il valore della funzione obiettivo, allora vuol dire che il modello quadratico non è una buona approssimazione della funzione obiettivo nella regione scelta, e quindi viene ridotta la dimensione della regione di confidenza.

Dal punto di vista matematico il modello quadratico che approssima la funzione obiettivo f è:

$$m_k(p) = f(x_k) + \nabla f(x_k)^T p + \frac{1}{2} p^T B_k p$$

In cui B_k è una matrice simmetrica.

Durante le iterazioni, il nuovo punto x_{k+1} viene scelto come $x_{k+1} = x_k + p$ in cui il passo p è determinato risolvendo il sotto problema

$$\min_{p \in \mathbb{R}^n} m_k(p) = f(x_k) + \nabla f(x_k)^T p + \frac{1}{2} p^T B_k p \quad \text{s.t.} \quad \|p\| \leq \Delta_k$$

dove Δ_k è il raggio della regione di confidenza.

La scelta del raggio Δ_k della regione di confidenza è molto importante; l'idea del metodo è di basare questa scelta misurando lo scostamento effettivo tra la riduzione della funzione obiettivo al nuovo punto x_{k+1} e la riduzione predetta dal modello $m_k(p)$. Viene quindi definito il rapporto

$$\rho_k = \frac{f(x_k) - f(x_k + p_k)}{m_k(0) - m_k(p_k)}$$

in cui il numeratore dà la riduzione ottenuta della funzione obiettivo (perché è la differenza tra il valore della funzione obiettivo nel punto corrente x_k e il valore della funzione obiettivo nel nuovo punto $x_k + p_k$), mentre il denominatore calcola la riduzione predetta (perché è la differenza tra il valore del modello quadratico nel punto corrente, dove $p = 0$, e il valore del modello quadratico nel punto proposto p_k).

Poiché il passo p_k è ottenuto mediante la minimizzazione del modello m_k in una regione in cui il passo $p = 0$, la riduzione predetta sarà sempre non negativa. Quindi se ρ_k è negativo, il nuovo valore della funzione obiettivo $f(x_k + p_k)$ sarà maggiore del valore attuale $f(x_k)$, e il passo p_k deve essere scartato. Se invece ρ_k si avvicina a 1, il modello quadratico m_k sta dando una buona approssimazione della funzione obiettivo al passo p_k , e quindi si può espandere la regione di

confidenza alla prossima iterazione (cioè si allunga il raggio della sfera). Infine, se ρ_k è positivo, ma non prossimo a 1, la regione di confidenza non viene modificata a meno che non sia molto vicino a 0.

Quindi il funzionamento dei modelli della famiglia Trust-Region è basato sulla risoluzione del sotto problema precedentemente esposto. La differenza tra i modelli **Trust-NCG**, **Trust-Krylov**, **Trust-Exact**, riguarda il modo in cui il sotto problema viene risolto [12]; in particolare il modello Trust-NCG usa l'algoritmo del "gradiente coniugato", il modello Trust-Krylov usa i sottospazi di Krylov mentre il modello Trust-Exact usa il metodo di Cholesky.

I modelli Trust-NCG e Trust-Krylov sono adatti per affrontare problemi su larga scala, cioè problemi con migliaia di variabili (e in particolare il modello Trust-Krylov risolve il sotto problema più accuratamente del problema Trust-NCG); invece il modello Trust-Exact viene utilizzato per problemi di media grandezza [12].

2.3.1 OTTIMIZZAZIONE DEI COEFFICIENTI DEL MODELLO PMV SEMPLIFICATO

Come precedentemente accennato, ciascun modello elencato è stato utilizzato per l'ottimizzazione dei coefficienti **a**, **b**, **c** dell'equazione per il calcolo del PMV semplificato (1), in modo da ridurre la deviazione tra il PMV standard (norma UNI EN ISO 7730) e il PMV semplificato [5] stesso (sPMV).

Per la precisione, per ogni Nazione selezionata è stato utilizzato ciascun modello per determinare i coefficienti ottimizzati per i tre intervalli di I_{cl} studiati da Buratti et al [5]. Questi set di nove coefficienti (tre coefficienti **a**, **b**, **c** per ogni intervallo I_{cl} per ogni modello, Tab 3.) sono stati utilizzati per calcolare il PMV semplificato ottimizzato (sPMV_{opt}).

Una volta determinato sPMV_{opt} è stato confrontato con il PMV standard ed il PMV semplificato di partenza, realizzando dei grafici specifici. Inoltre, sono state calcolate le metriche di performance Mean Squared Error (MSE) e Mean Absolute Error (MAE) per verificare il miglioramento ottenuto per ogni modello e, di conseguenza, permettere la selezione del miglior modello di ottimizzazione.

Tra i vari modelli di ottimizzazione è stato selezionato il modello **BFGS**, in quanto concorde con la letteratura [11]. Infatti, Zhang utilizza il "Variable Metric Algorithm" basato sui metodi quasi-Newton tra cui il BFGS. Di conseguenza, sono stati selezionati i coefficienti **a**, **b**, **c** (**Eq 1**) ottimizzati mediante questo modello.

Successivamente è stata effettuata un'analisi di sensibilità, basata sul metodo Monte Carlo, che permette di osservare come i cambiamenti di alcune variabili in input ad un modello, modificano i risultati in output dello stesso [19]. Poiché l'equazione del modello per il calcolo del PMV semplificato (1) è costituita da due variabili, tramite l'analisi di sensibilità si determina quale tra le due variabili ha il peso maggiore sul risultato finale.

Sono state infine calcolate le categorie, per ciascuna Nazione selezionata, le quali permettono di classificare il livello di comfort termico negli edifici. In questo modo, si possono porre a confronto i tre modelli di PMV utilizzati, ovvero il PMV standard (norma UNI EN ISO 7730 [2]), il PMV

semplificato proposto da Buratti et al. [5] e il PMV semplificato ottimizzato attraverso i coefficienti del metodo BFGS.

3. RISULTATI

Alla luce della metodologia e degli algoritmi illustrati nel capitolo 2 “Materiali e Metodi”, il seguente capitolo è dedicato ai risultati relativi alle attività descritte in precedenza.

3.1 METRICHE DI VALIDAZIONE E COEFFICIENTI OTTIMIZZATI

Di seguito è riportata la tabella che riassume i valori ottenuti, ovvero i risultati delle metriche di performance e i relativi coefficienti calcolati per ogni Nazione mediante il modello di ottimizzazione BFGS.

Tabella 4. Risultati MAE, MSE e coefficienti ottimizzati

	PMV vs sPMV _{opt}		PMV vs sPMV		sPMV vs sPMV _{opt}		Coefficienti ottimizzati		
	MAE medio	MSE medio	MAE	MSE	MAE medio	MSE medio	I _{cl} 0.25-0.50	I _{cl} 0.51-1.00	I _{cl} 1.00-1.65
Svezia	0.22	0.08	0.28	0.13	0.19	0.07	a=0.1121 b=0.0421 c=2.5284	a=0.1120 b=0.0421 c=2.5283	a=0.1121 b=0.0421 c=2.5305
Portogallo	0.31	0.16	0.37	0.22	0.24	0.08	a=0.1054 b=0.1432 c=2.2482	a=0.1054 b=0.1432 c=2.2482	a=0.1054 b=0.1432 c=2.2478
Grecia	0.29	0.16	0.31	0.17	0.08	0.01	a=0.1606 b=0.1515 c=3.7176	a=0.1606 b=0.1515 c=3.7179	a=0.1606 b=0.1515 c=3.7178
Regno Unito	0.36	0.21	0.60	0.54	0.51	0.37	a=0.1920 b=0.3381 c=5.3879	a=0.1921 b=0.3380 c=5.3882	a=0.1921 b=0.3380 c=5.3883
Francia	0.28	0.13	0.32	0.18	0.12	0.06	a=0.1465 b=0.0453 c=3.2429	a=0.1465 b=0.0453 c=3.2429	a=0.1465 b=0.0453 c=3.2431
Valori medi	0.292	0.148	0.376	0.248	0.228	0.118			

Nelle colonne “PMV vs sPMV_{opt}” (Tab. 4) e “sPMV vs sPMV_{opt}” (Tab. 4) sono riportati MAE medio e MSE medio, ovvero la media tra i valori MAE e MSE dei sei modelli di ottimizzazione utilizzati per ciascuna Nazione.

Nella tabella successiva sono invece riportati i miglioramenti percentuali ottenuti per ogni Paese. Poiché mediante il calcolo del MAE si può constatare una riduzione dell’errore, dato che il suo valore tra i modelli PMV e sPMV_{opt} è minore rispetto ai modelli PMV e sPMV, vuol dire che si ha avuto un miglioramento tra prima e dopo l’ottimizzazione e questo miglioramento viene quantificato percentualmente (Tab. 5).

Tabella 5. Differenza percentuale per le varie nazioni europee

	PMV vs sPMV _{opt}	PMV vs sPMV	
	MAE medio	MAE medio	Differenza (%)
Svezia	0.22	0.28	21.43%
Portogallo	0.31	0.37	16.21%
Grecia	0.29	0.31	6.45%
Regno Unito	0.36	0.60	40%
Francia	0.28	0.32	12.5%

3.2 PMV SEMPLIFICATO OTTIMIZZATO

I seguenti grafici riportati mostrano il confronto tra “PMV vs sPMV_{opt}”, “PMV vs sPMV_{opt}”, “sPMV vs sPMV_{opt}”, in modo da verificare le differenze prima e dopo l’ottimizzazione.

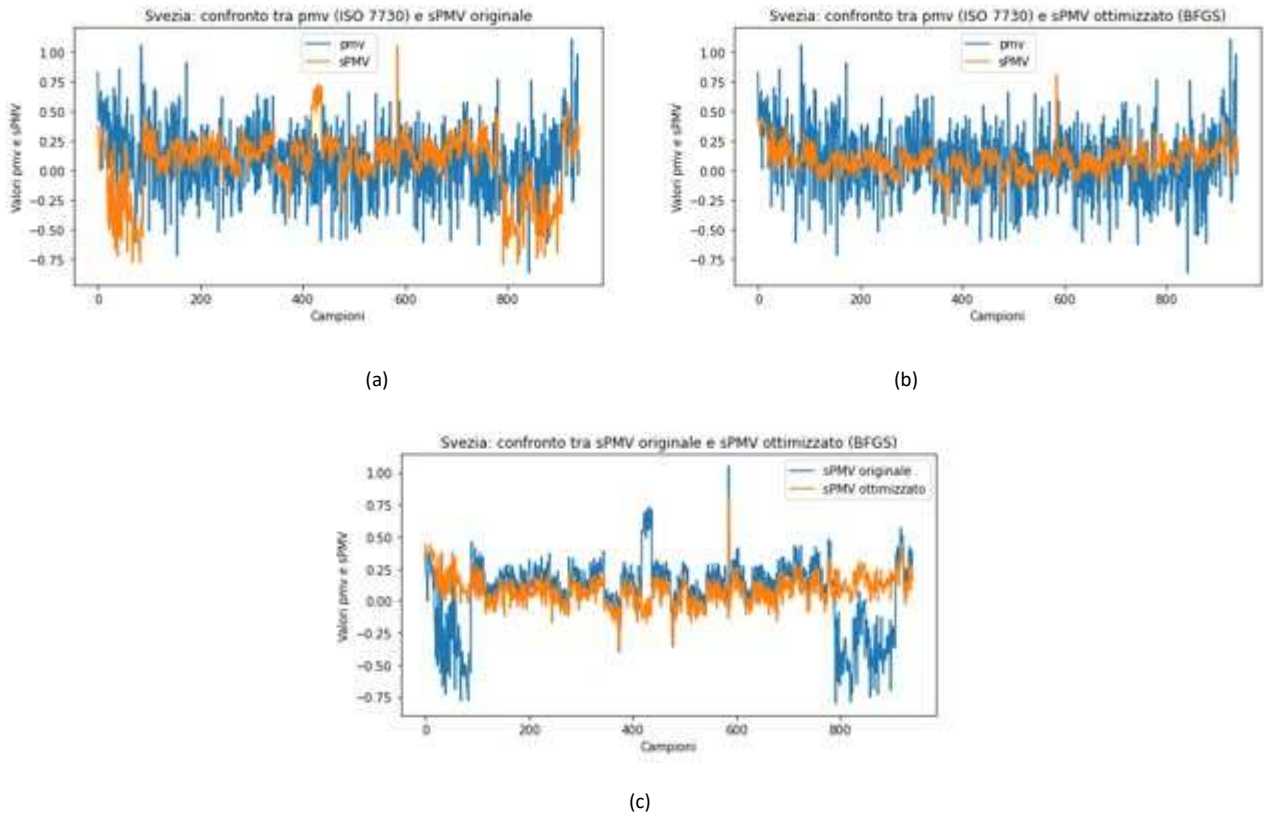
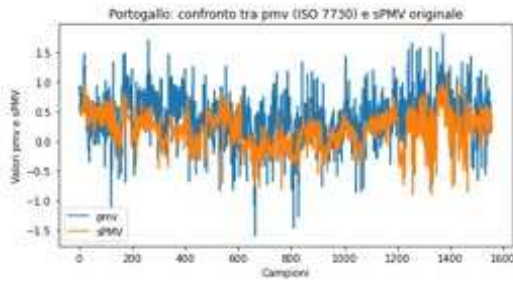
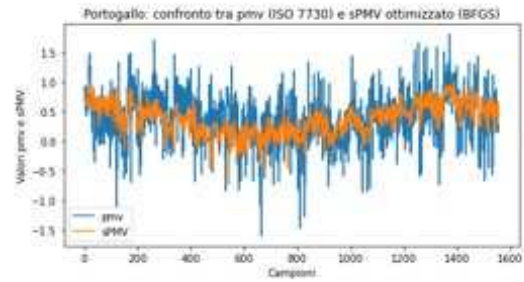


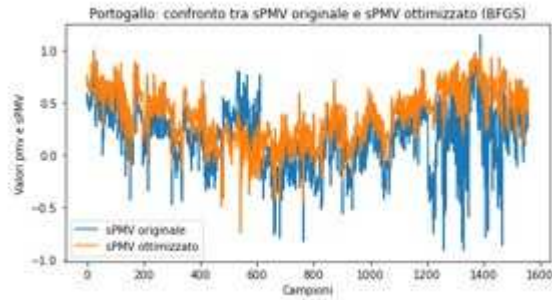
Figura 11. Grafici di confronto tra PMV standard e sPMV (a), PMV standard e sPMV ottimizzato (b), sPMV e sPMV ottimizzato. I grafici riportati sono relativi alla Svezia.



(a)

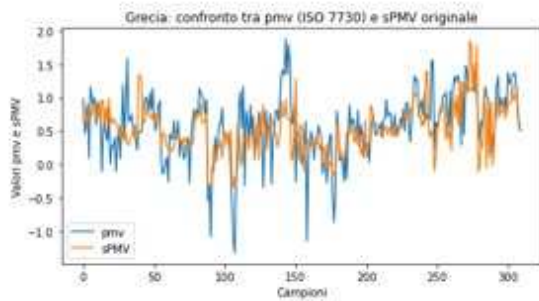


(b)

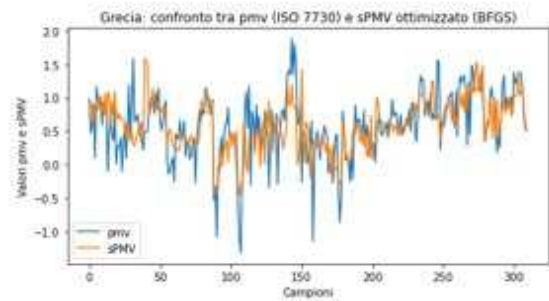


(c)

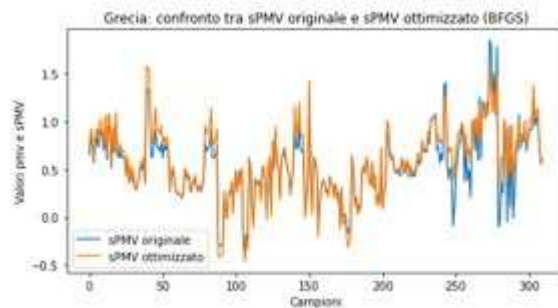
Figura 12. Grafici di confronto tra PMV standard e sPMV (a), PMV standard e sPMV ottimizzato (b), sPMV e sPMV ottimizzato (c). I grafici riportati sono relativi al Portogallo.



(a)



(b)



(c)

Figura 13. Grafici di confronto tra PMV standard e sPMV (a), PMV standard e sPMV ottimizzato (b), sPMV e sPMV ottimizzato (c). I grafici riportati sono relativi alla Grecia.

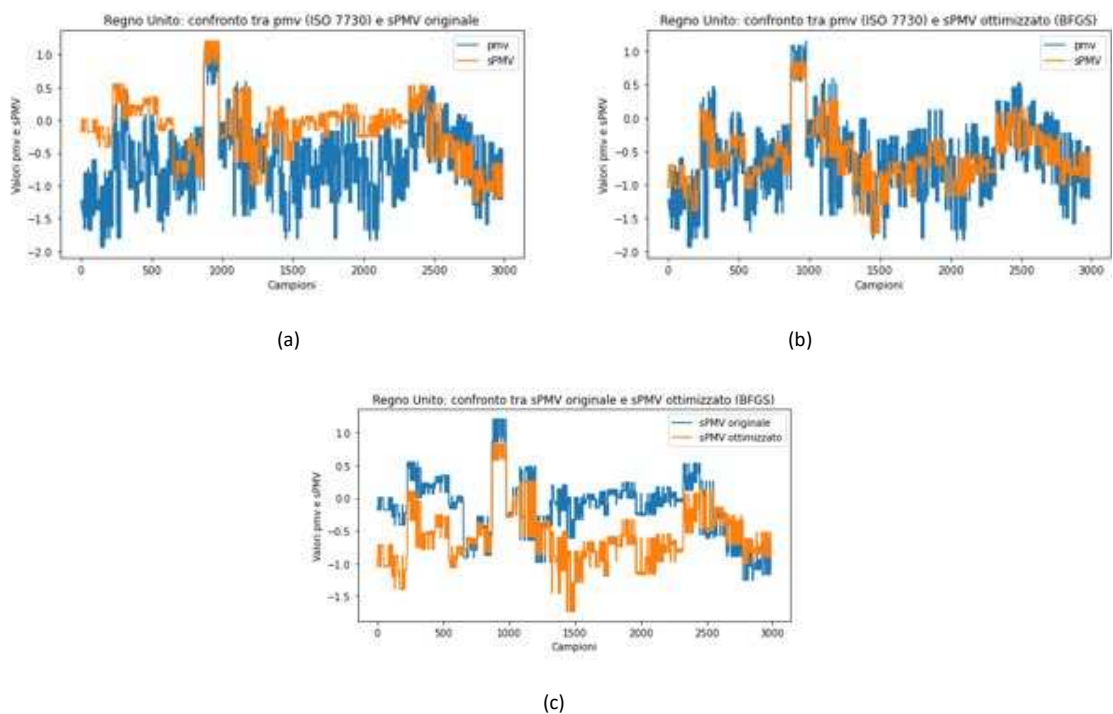


Figura 14. Grafici di confronto tra PMV standard e sPMV (a), PMV standard e sPMV ottimizzato (b), sPMV e sPMV ottimizzato (c). I grafici riportati sono relativi al Regno Unito.

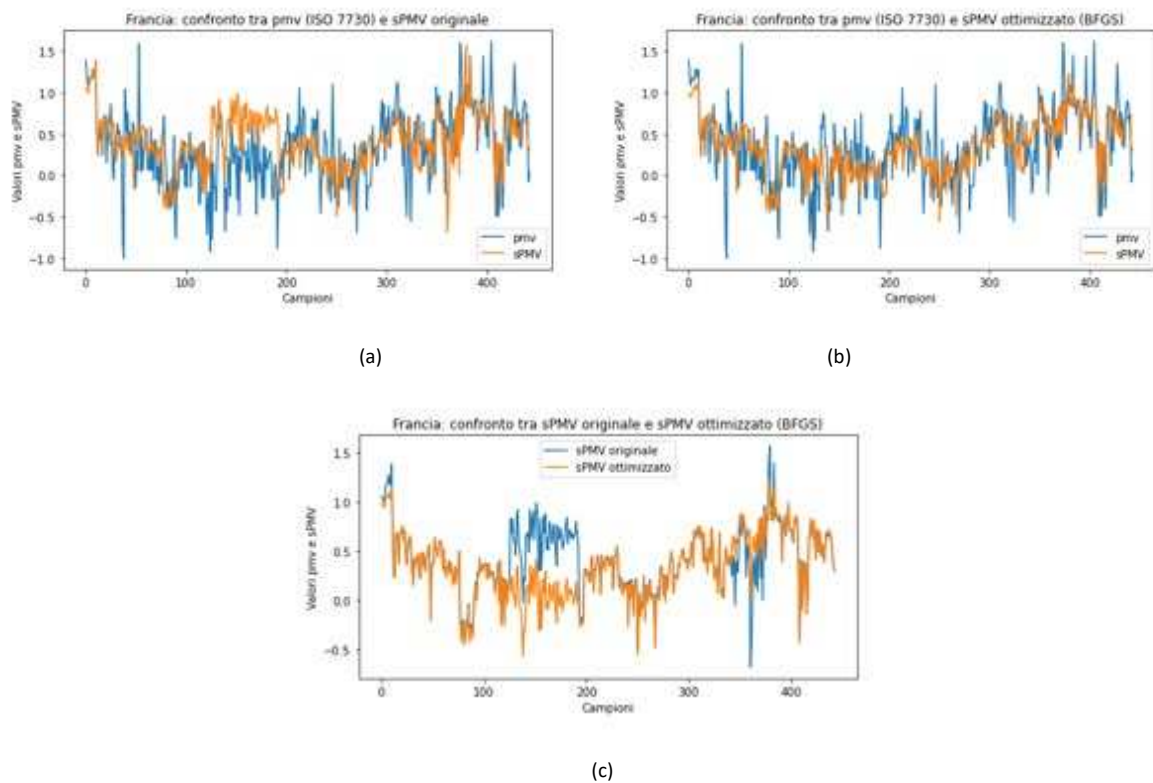


Figura 15. Grafici di confronto tra PMV standard e sPMV (a), PMV standard e sPMV ottimizzato (b), sPMV e sPMV ottimizzato (c). I grafici riportati sono relativi alla Francia.

3.3 ANALISI DI SENSIBILITÀ E CATEGORIE DEL PMV

In questo paragrafo sono riportati i risultati dell'analisi di sensibilità e i grafici relativi alle categorie del PMV per tutte le nazioni analizzate nel seguente studio.

3.3.1 SVEZIA

Tabella 6. Valori analisi sensibilità Svezia

	T_a	T_r	RH	Vel
PMV	47.67%	35,65%	12.77%	1.74%
sPMV_{opt}	97.63%		1.65%	

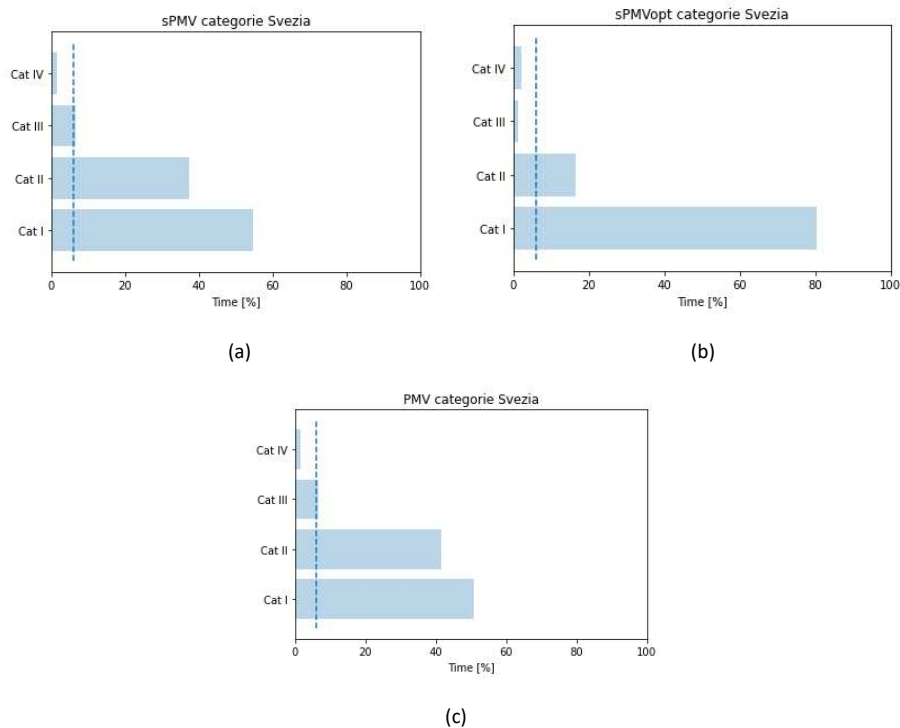
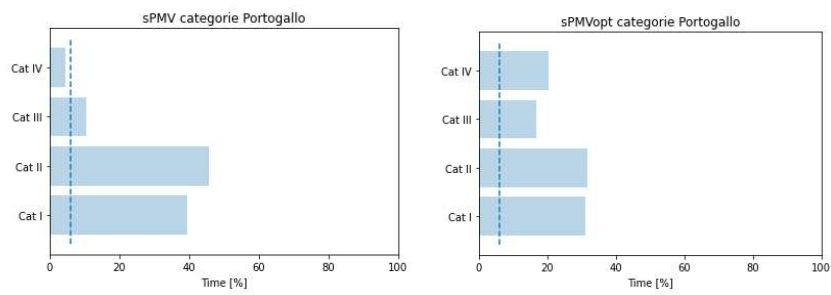


Figura 16. Grafici categorie Svezia per sPMV (a), sPMV_{opt} (b), PMV (c)

3.3.2 PORTOGALLO

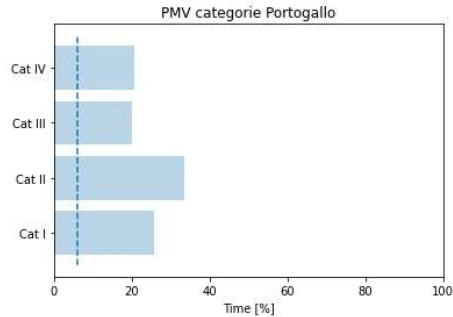
Tabella 7. Valori analisi sensibilità Portogallo

	T_a	T_r	RH	Vel
PMV	57.10%	38.61%	1.13%	1.40%
sPMV_{opt}	99.17%		1.40%	



(a)

(b)



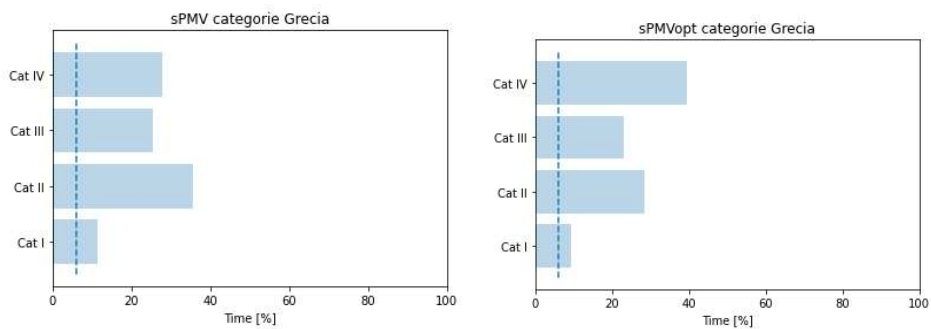
(c)

Figura 17. Grafici categorie Portogallo per sPMV (a), sPMV_{opt} (b), PMV (c)

3.3.3 GRECIA

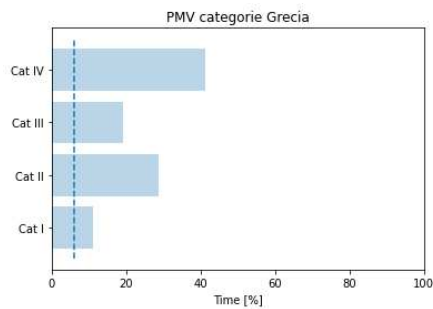
Tabella 8. Valori analisi sensibilità Grecia

	T_a	T_r	RH	Vel
PMV	56.87%	33.90%	2.57%	3.94%
sPMV_{opt}	98.76%		1.51%	



(a)

(b)



(c)

Figura 18. Grafici categorie Grecia per sPMV (a), sPMV_{opt} (b), PMV (c)

3.3.4 REGNO UNITO

Tabella 9. Valori analisi sensibilità Regno Unito

	T_a	T_r	RH	Vel
PMV	55.98%	35.55%	1.89%	3.90%
sPMV_{opt}	96.71%		3.04%	

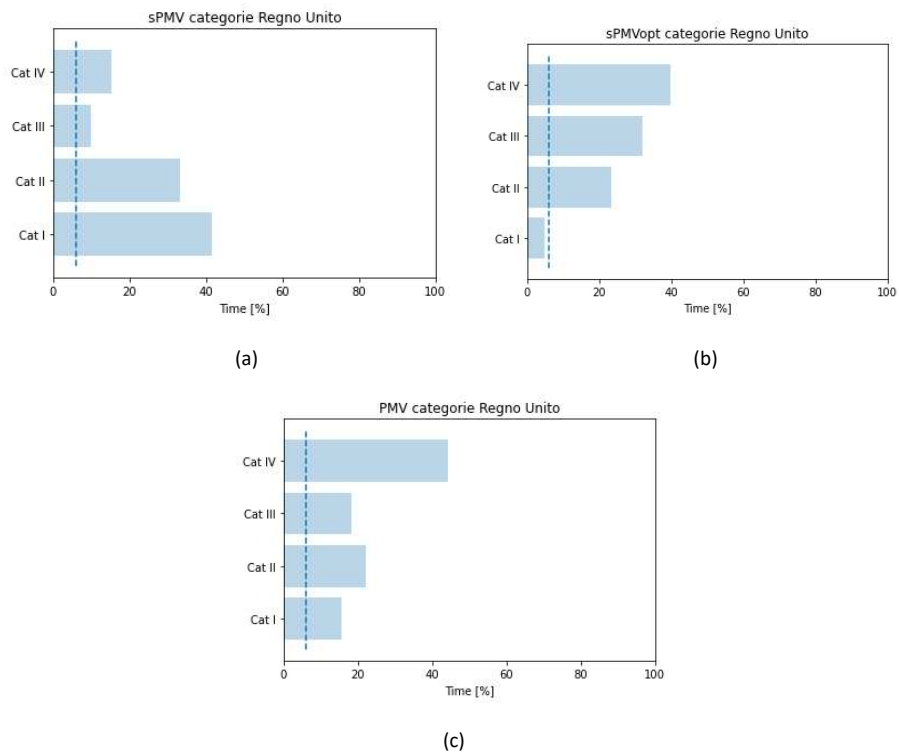


Figura 19. Grafici categorie Regno Unito per sPMV (a), sPMV_{opt} (b), PMV (c)

3.3.5 FRANCIA

Tabella 10. Valori analisi sensibilità Francia

	T_a	T_r	RH	Vel
PMV	47.86%	39.40%	2.80%	2.45%
sPMV_{opt}	99.84%		0.20%	

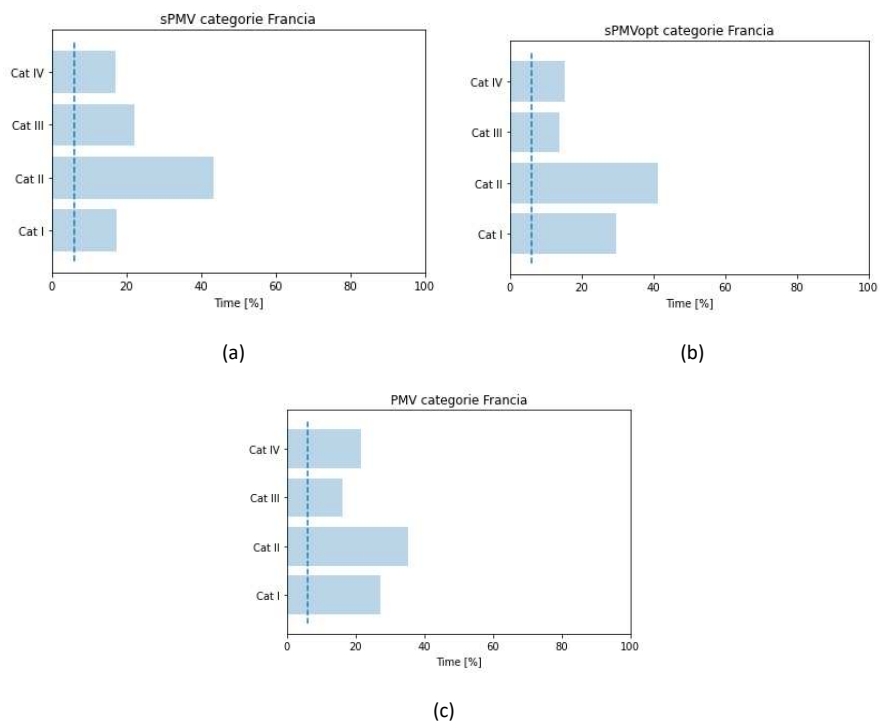


Figura 20. Grafici categorie Francia per sPMV (a), sPMV_{opt} (b), PMV (c)

Una volta determinate le categorie, sono state calcolate le differenze percentuali tra di esse per PMV-sPMV e PMV-sPMV_{opt}. A titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti per il Portogallo:

Tabella 11. Differenze percentuali PMV-sPMV e PMV-sPMV_{opt} per il Portogallo

	PMV - sPMV	PMV - sPMV_{opt}
Categoria I	53.36%	21.19%
Categoria II	36.46%	4.99%
Categoria III	48.24%	16.29%
Categoria IV	78.32%	2.47%

4. DISCUSSIONI

Questa sezione è incentrata sulla presentazione e l'analisi dei risultati ottenuti nel seguente studio e riportati nel capitolo precedente (Capitolo 3), mettendoli a confronto con i dati presenti nella letteratura attuale. L'obiettivo del lavoro di tesi è quello di ottimizzare i coefficienti **a**, **b**, **c** dell'equazione (1) per il calcolo del PMV semplificato [5] in modo da minimizzare l'errore tra il PMV standard della normativa UNI EN ISO 7730 e quello semplificato (sPMV) proposto da Buratti et al. [5].

Per raggiungere l'obiettivo è stata sviluppata una metodologia incentrata sull'utilizzo di sei modelli di ottimizzazione implementati mediante il linguaggio di programmazione Python. I risultati mostrano come il modello del PMV semplificato sia stato effettivamente migliorato se confrontato con la situazione iniziale corrispondente alla letteratura presente fino a questo momento; infatti ci sono stati miglioramenti percentuali rispettivamente del 21,43% per la Svezia, del 16,21% per il Portogallo, del 6,45% per la Grecia, del 40% per il Regno Unito e del 12,5% per la Francia.

In particolare, l'ottimizzazione è stata effettuata mediante il modello BFGS, scelto tra i sei modelli utilizzati considerando la base di letteratura [11]. I risultati ottenuti dimostrano la riduzione dell'errore, mostrata dalla diminuzione dei valori delle metriche di performance Mean Squared Error (MSE) e Mean Absolute Error (MAE), in base alle quali è stato calcolato il miglioramento percentuale ottenuto per ciascuna Nazione, precedentemente citato, e mostrato anche graficamente dalle Figure 11-15. Alcuni valori delle metriche MAE e MSE che mostrano l'effettiva ottimizzazione sono: per la Svezia i valori del MAE e del MSE sono diminuiti rispettivamente da 0.28 a 0.22 e da 0.13 a 0.08, per il Portogallo i valori di MAE e MSE sono diminuiti rispettivamente da 0.37 a 0.31 e da 0.22 a 0.16.

Successivamente è stata effettuata un'analisi di sensibilità, la quale permette di stabilire in un modello quali variabili influenzano maggiormente il risultato finale. I risultati ottenuti suggeriscono che il PMV semplificato è molto sensibile alle variazioni della temperatura e poco sensibile alle variazioni dell'umidità relativa. Ciò implica che anche piccole variazioni della temperatura possono determinare notevoli cambiamenti nel valore del PMV mentre questo non accade per l'umidità relativa. Per questo motivo, essendo il modello del PMV semplificato influenzato in modo così preponderante dalla temperatura, suggerisce che il controllo della temperatura è di fondamentale importanza per la definizione del comfort termico.

Infine si è passati al calcolo delle categorie per il PMV determinato secondo la norma UNI EN ISO 7730, per il PMV semplificato calcolato utilizzando i coefficienti definiti da Buratti et al. [5] e il PMV semplificato ottimizzato. A titolo di esempio, sono state calcolate le differenze percentuali tra le categorie nel caso del Portogallo, i cui risultati sono riportati in Tabella 11. I risultati mostrano come gli scarti percentuali tra le categorie siano diminuiti dopo l'ottimizzazione, quindi si può constatare come una riduzione dell'errore tra i due modelli sia effettivamente avvenuta.

5. CONCLUSIONI

Il modello per il calcolo del PMV è stato realizzato attraverso studi condotti in laboratorio, per questo quando viene applicato in condizioni reali presenta delle limitazioni:

1. È stato ideato per prevedere il comfort termico medio di un ampio gruppo di utenti, quindi esibisce una bassa accuratezza se applicato a un gruppo più piccolo di utenti.
2. È difficile valutare l'esatto valore delle variabili in input nonostante esistano norme che specificano come le quantità per la valutazione del PMV debbano essere misurate; in particolare l'indice metabolico può variare durante la giornata e l'isolamento termico del vestiario può non essere costante nel tempo
3. Non tutti i sei parametri necessari per il suo calcolo sono sempre disponibili (temperatura dell'aria T_a , temperatura media radiante T_r , velocità dell'aria V_a , umidità relativa **RH**, isolamento termico del vestiario I_{cl} e indice metabolico **M**)

Per questo motivi Rohles F.H. [4] ha condotto degli studi per poter semplificare l'equazione per il calcolo del PMV in modo da renderla funzione di parametri facilmente misurabili, ovvero temperatura dell'aria T_a e umidità relativa **RH**. L'equazione determinata è $PMV = aT_a + bP_v - c$ (1), valida solo per $I_{cl}=0.6$ per il quale sono stati determinati i coefficienti $a=0.245$, $b=0.248$, $c=6.475$. Buratti et al. [5] hanno ampliato l'applicazione dell'equazione, determinando tre intervalli I_{cl} e calcolando per ognuno di essi i nuovi coefficienti **a**, **b**, **c** come riportato in Tabella 3.

L'obiettivo di questo studio è minimizzare l'errore tra il modello aggiornato di Buratti et al. [5] e il modello presente sulla norma UNI EN ISO 7730 [2], calcolando nuovi coefficienti **a**, **b**, **c** dell'equazione; per fare questo sono stati utilizzati sei modelli di ottimizzazione (**Nelder-Mead**, **BFGS**, **Newton-CG**, **Trust-NCG**, **Trust-Krylov**, **Trust-Exact**), implementati con il linguaggio Python, in modo da determinare i coefficienti **a**, **b**, **c** per ognuno dei tre intervalli I_{cl} definiti da Buratti. L'innovazione portata in questo studio riguarda il calcolo dei coefficienti **a**, **b**, **c**; questi sono stati determinati in modo da tenere in considerazione le diverse zone climatiche europee perché in questo modo il modello può essere applicato a tutte le Nazioni situate in tali zone; è quindi un'espansione del modello di Buratti et al. [5] poiché, nel loro studio, questa suddivisione non è stata presa in considerazione.

Una volta determinati i coefficienti, sono stati utilizzate le metriche di performance MAE e MSE per poter quantificare la riduzione dell'errore tra PMV e $sPMV_{opt}$ per ogni Nazione (come mostrato in Tabella 4) e sono stati calcolati i relativi miglioramenti percentuali (come mostrati in Tabella 5). In particolare, si è ottenuto un miglioramento medio del 19,32% e si è passati da un MAE medio=0.38 e MSE medio=0.25 presenti in letteratura a un MAE medio=0.29 e MSE medio=0.15, dove per "MAE medio" e "MSE medio" si intende la media tra i valori MAE e MSE calcolati per ciascuna Nazione sia nel confronto tra PMV e $sPMV$, sia nel confronto tra PMV e $sPMV_{opt}$.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] N. Djongyang, R. Tchinda, and D. Njomo, "Thermal comfort: A review paper," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9. Elsevier Ltd, 2010. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.040.
- [2] "NORMA 7730".
- [3] N. Morresi *et al.*, "Sensing physiological and environmental quantities to measure human thermal comfort through machine learning techniques," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 10, pp. 12322–12337, May 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3064707.
- [4] F. H. Rohles, "Thermal Sensations of Sedentary Man in Moderate Temperatures," 1971.
- [5] C. Buratti, P. Ricciardi, and M. Vergoni, "HVAC systems testing and check: A simplified model to predict thermal comfort conditions in moderate environments," *Appl Energy*, vol. 104, pp. 117–127, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.015.
- [6] "Benessere termoigrometrico".
https://architettura.unige.it/per/doc/isettic/matdid11_12/pdf/parte2/cap2_2.pdf.
- [7] "Sistema simpatico e parasimpatico - Enciclopedia - Treccani".
- [8] "ASHRAE STANDARD," 2010. [Online]. Available: www.ashrae.org
- [9] "GitHub - CenterForTheBuiltEnvironment_ashrae-db-II".
<https://github.com/CenterForTheBuiltEnvironment/ashrae-db-II>
- [10] "Classificazione dei climi di Köppen". https://it.wikipedia.org/wiki/Climi_in_Europa
- [11] S. Zhang, Y. Cheng, M. Olaide Oladokun, Y. Wu, and Z. Lin, "Improving predicted mean vote with inversely determined metabolic rate," *Sustain Cities Soc*, vol. 53, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101870.
- [12] "Optimization (scipy.optimize) — SciPy v1.13.1 Manual".
<https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/optimize.html>
- [13] "Metodo di Nelder-Mead - Wikipedia".
- [14] S. Dottorale, C. S. Menicucci, I. Umberto, and E. Bemporad, "UNIVERSITÀ DEGLI STUDI ROMA TRE Schema innovativo per la gestione multilivello di modelli approssimati in ottimizzazione globale," 2013.
- [15] "Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno algorithm - Wikipedia".
- [16] "Newton's method in optimization - Wikipedia".
- [17] S. G. Nash, "A survey of truncated-Newton methods," 2000. [Online]. Available: www.elsevier.nl/locate/cam
- [18] "Metodi Trust Region". chrome-extension://efaidnbmnnnibpcjpcglclefindmkaj/https://mate.unipv.it/gualandi/metodi/capitolo_3.pdf
- [19] "Vedrai - Sensitivity Analysis, cos'è e come si applica _ Magazine". <https://vedrai.com/it/magazine/sensitivity-analysis-cos-e-e-come-si-applica>