

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Misura della trasmittanza termica con termografia: Comfort Eye
Infrared thermography for thermal transmittance determination:
Comfort Eye

Relatore – Prof. Ing. Gian Marco Revel

Correlatrice – Dott.ssa Serena Serroni

Laureando – Marco Terenzi

Anno Accademico 2020/2021

Abstract

La misurazione continua delle prestazioni termiche dell'edificio è importante per garantire la prima funzione di un edificio: fornire un ambiente di vita confortevole e salubre con il minimo consumo energetico. Questo lavoro mira ad esplorare il Comfort Eye, un dispositivo multi-sensore IoT, applicato per il monitoraggio termico continuo e in tempo reale dell'edificio. In questo contesto, il Comfort Eye viene adottato per identificare le principali fonti di disagio o inefficienze dell'involucro edilizio, ad esempio punti a rischio condensa, e per fornire un metodo sperimentale alternativo per la misurazione della temperatura superficiale degli elementi edilizi, attraverso il quale è possibile stimare il coefficiente di scambio termico o il valore U.

Per validare il metodo di misurazione delle prestazioni di isolamento termico degli elementi edilizi è stato condotto un esperimento di verifica utilizzando un edificio reale ed il termoflussimetro come sensore di riferimento. I risultati hanno confermato che è possibile garantire la precisione di misurazione richiesta. Inoltre, la metodologia innovativa descritta in questo documento può essere utilizzata per una stima del valore U relativamente veloce ed economica senza l'uso di apparecchiature di misurazione aggiuntive (ad esempio sensori di flusso di calore).

L'elaborato propone inoltre, partendo da dati fittizi, delle soluzioni per rilevare automaticamente ponti termici non corretti e punti a rischio condensa.

Indice:

| | |
|--|----|
| 1. Introduzione | 5 |
| 2. Comfort termico | 7 |
| 3. Efficienza energetica di un edificio | 19 |
| 4. Valutazione della trasmittanza termica in sito | 25 |
| 4.1. HFMM (Heat Flow Meter Method) | 25 |
| 4.2. Termografia | 30 |
| 4.2.1. Linee guida della ISO 9869-2: 2018 per la determinazione in sito della trasmittanza termica tramite camera IR | 36 |
| 5. Comfort Eye | 42 |
| 6. Proposta del Comfort Eye per la determinazione della trasmittanza termica | 51 |
| 7. Modelli matematici applicati | 52 |
| 7.1. Modelli matematici applicati al Comfort Eye | 52 |
| 7.2. Modelli matematici applicati al termoflussimetro | 54 |
| 8. Validazione del Comfort Eye nella determinazione della trasmittanza termica | 55 |
| 8.1. Determinazione di UHFM | 56 |
| 8.2. Determinazione di UComfort Eye | 59 |
| 8.3. Considerazioni finali | 60 |
| 9. Rilevazione di ponti termici non corretti | 62 |
| 10. Rilevazione di punti a rischio condensa | 66 |
| 11. Conclusioni | 68 |
| 12. Bibliografia e riferimenti | 69 |
| 13. Appendice | 71 |
| 14. Codici implementati in Python | 78 |
| 15. Riflessioni e ringraziamenti | 82 |

1. Introduzione

La misura continua ed in tempo reale delle prestazioni termiche di una costruzione è importante al fine di garantire condizioni ottimali di comfort dell'individuo al suo interno e per assicurare un certo standard di efficienza energetica.

A separare l'ambiente interno da quello esterno abbiamo quello che è chiamato involucro edilizio, ed è la sua composizione a rappresentare la qualità termica dell'edificio. In particolare, è importante il corretto isolamento termico, la stratigrafia della parete, utile a limitare i flussi di calore attraverso di essa per poter mantenere un determinato microclima.

La trasmittanza termica $U \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ è il flusso di calore che passa attraverso una struttura di 1 m^2 di superficie e con una differenza di temperatura tra gli ambienti delimitati dalla struttura stessa pari a $1K$. [4].

In fase di progetto e/o conoscendo la stratificazione della parete, è possibile calcolare la trasmittanza termica delle superfici opache con le linee guida della normativa ISO 6946 [6]. Questo però non sempre è possibile, potrebbe capitare che la composizione della parete non sia nota a priori e comunque, anche se lo fosse, con il tempo la struttura potrebbe essersi degradata tanto da avere una trasmittanza termica che si discosta da quella di progetto. È per questa ragione che, qualora non si vogliano adottare tecniche distruttive, vengono utilizzate delle tecniche non distruttive per la determinazione in sito della trasmittanza termica.

Tra le tecniche non distruttive appena citate troviamo ad esempio l'HFM (Heat Flux Method) da normativa ISO 9869-1:2014 [9] che prevede la misura della densità di flusso termico tramite termoflussimetro e la misura della temperatura dell'aria interna ed esterna tramite termoresistenze. Lo svantaggio di tale sistema risiede nel fatto che è possibile acquisire la densità di flusso termico di uno o alcuni punti della parete e per questo motivo non è rappresentativo di tutta l'intera parete in esame. Inoltre, eventuali ponti termici nella parete sono difficilmente rilevabili con questo metodo portando ad una sottostima della trasmittanza termica.

Una alternativa maturata in questi ultimi anni adatta a valicare queste problematiche è data dalla determinazione e valutazione della trasmittanza termica tramite sensori IR. Una termocamera è in grado di scansionare una ampia zona, contrariamente all'HFM, permettendo anche di capire se nella parete è presente o meno un difetto come lo possono essere i ponti termici o i punti a rischio condensa.

Parlando dei contro di questa tecnica, essa ha un basso valore di accuratezza (circa 20%) poiché fortemente dipendente dalle condizioni ambientali (radiazione solare esterna e vento) determinando quindi una bassa ripetibilità di misura. Per far fronte a questo è consigliabile acquisire dati in condizioni stazionarie o comunque quasi-stazionarie.

La normativa ISO 9869-2:2018 [10] ci dà direttive proprio sulla determinazione della trasmittanza termica tramite camera IR. Per stimare la trasmittanza termica, la norma suggerisce di effettuare misurazioni notturne per almeno tre giorni consecutivi; alternativamente la misurazione si può fermare quando la trasmittanza termica, calcolata con il metodo della media mobile, converge ad un valore stazionario la cui variazione è entro il 10%.

La metodologia proposta in questa tesi si basa sulla determinazione della trasmittanza termica con un dispositivo multi-sensore IoT chiamato Comfort Eye [19]. Il Comfort Eye è un sensore composto da due nodi: il ceiling node con il sensore IR e il desk node con sensori per misurare la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la quantità di CO₂, il particolato (PM) e la luminosità. Il sistema è in grado di monitorare continuamente ed in tempo reale la condizione di comfort dell'individuo all'interno dell'ambiente interessato.

Lo scopo di questo lavoro è quindi quello di validare il Comfort Eye, capace di fornire misure in tempo reale, nella valutazione della efficienza energetica di un edificio, in particolare di superfici opache verticali, attraverso la determinazione della trasmittanza termica U e del suo degradamento nel tempo (sempre in termini energetici).

Per validare lo strumento proposto prenderemo a riferimento la trasmittanza termica U determinata mediante HFM (Heat Flow Meter, termoflussimetro).

Nell'elaborato sono anche presenti dei modelli sperimentali per la rilevazione di ponti termici non corretti e la rilevazione di punti a rischio condensa.

Al fine di richiamare i concetti fisici degli argomenti che verranno trattati in seguito si prenda in considerazione l'Appendice.

2. Comfort termico

Al fine di arrivare alla definizione e comprendere cos'è il comfort termico è bene parlare di come viene scambiata la potenza tra individuo e ambiente [4].

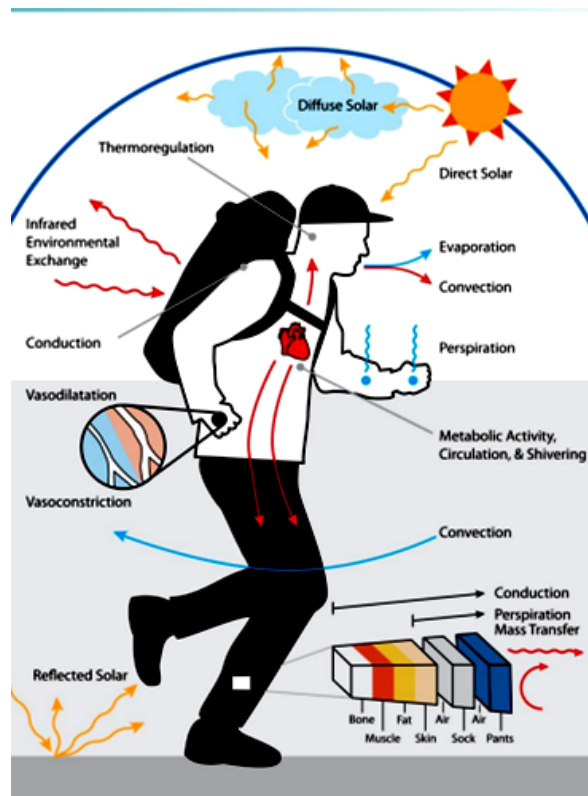


Figura 1-Potenza scambiata tra uomo e ambiente

Nella fisiologia della termoregolazione il corpo umano è diviso in due zone principali:

- Zona esterna in cui si considera la temperatura della pelle e dei tessuti sottocutanei. Qui la temperatura è fortemente variabile e dipende dalla zona del corpo misurata: le dita possono arrivare ad avere una temperatura molto più bassa di quella della fronte ad esempio
- Zona interna (core) che comprende gli organi vitali e che ha una temperatura costante (circa 37°C in un soggetto sano). Indichiamo con T_b questa temperatura.

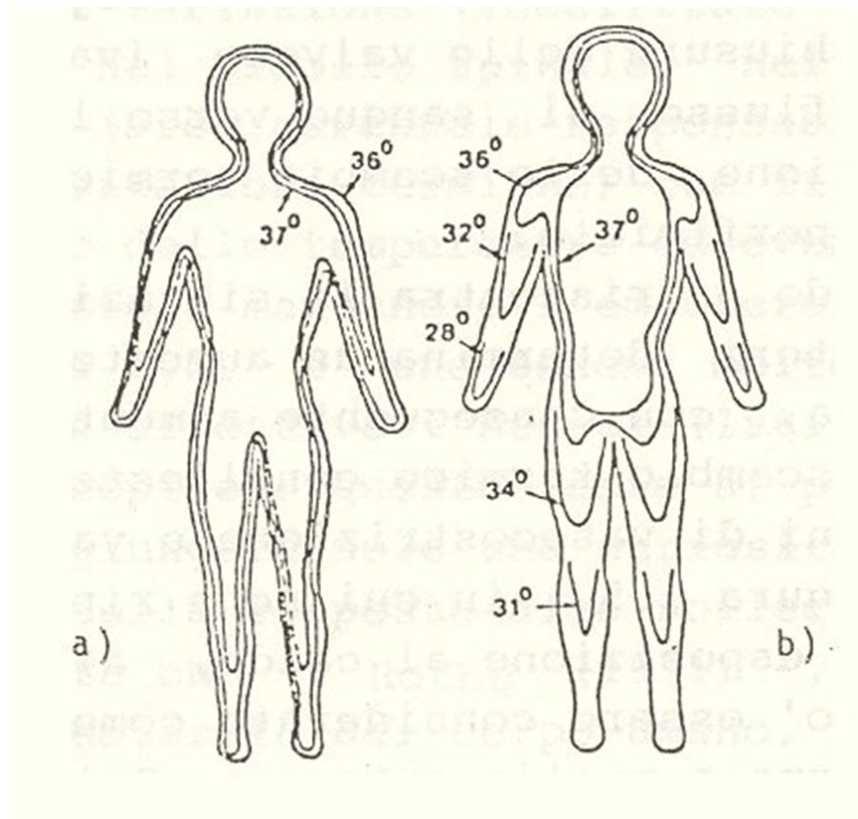


Figura 2- Distribuzione di temperatura nel corpo umano

In Figura 2 troviamo le isoterme del corpo umano esposto ad un ambiente caldo nella rappresentazione a) e in uno freddo nella rappresentazione b).

Il compito di mantenere la temperatura T_b di circa 37°C è del sistema di termoregolazione. In particolare, il primo meccanismo di termoregolazione ad entrare in azione è quello vasomotorio in cui contro il caldo abbiamo la vasodilatazione e contro il freddo la vasocostrizione.

Se questo non fosse sufficiente a mantenere la T_b costante, entra in gioco il meccanismo di termoregolazione comportamentale attivando la sudorazione in caso di caldo e i brividi contro il freddo.

Se anche quest'ultimo non fosse sufficiente ad assicurare l'omeotermia si andrebbe in contro alla ipertermia o alla ipotermia.

Possiamo scrivere l'equazione di bilancio delle potenze scambiate tra individuo e ambiente in questo modo:

$$S = M - W - R - C - C_k - E_d - E_{sw} - E_{ve} - C_{ve}$$

Eq. 1

L' Eq. 1 è detta equazione di Fanger.

- S rappresenta la variazione unitaria di energia interna del corpo umano per unità di tempo
- M è la potenza unitaria prodotta dal metabolismo
- W è la potenza meccanica unitaria che il corpo umano cede all'ambiente sottoforma di lavoro dei muscoli
- R è la potenza termica unitaria dispersa per irraggiamento
- C è la potenza termica unitaria dispersa per convezione
- C_k è la potenza termica unitaria dispersa per conduzione
- E_d è la potenza termica unitaria dispersa per diffusione attraverso la pelle
- E_{sw} è la potenza termica unitaria dispersa per sudorazione attraverso la pelle
- E_{ve} è la potenza termica unitaria dispersa nella respirazione come calore latente
- C_{ve} è la potenza termica unitaria dispersa nella respirazione come calore sensibile

Per quanto riguarda la variazione unitaria di energia interna S , si può dire che:

$$S = \frac{dU_b}{dt} = \frac{c_b m_b}{A_b} \frac{dT_b}{dt}$$

Eq. 2

Dove m_b [kg] è la massa del corpo umano, A_b [m²] è l'area del corpo umano e c_b [kJ/(kg°C)] è il calore specifico del corpo umano.

Dalla formula di Du Bois possiamo calcolare $A_b = 0,202m_b^{0,425}H^{0,725}$, dove H è l'altezza espressa in metri del soggetto.

Per il calcolo del calore specifico del corpo umano c_b possiamo utilizzare il modello di Chen, dove $c_b = 4,19 - 2,30x_s - 0,628x_s^3$ in cui x_s rappresenta la frazione massica di solido. Mediamente, nel corpo umano, si ha una percentuale di acqua pari al 72%, quindi la frazione massica di solido sarà $x_s = 0,28$. Da queste considerazioni possiamo dire che $c_b \approx 3,53$ [kJ/(kg°C)].

Condizione necessaria, ma non sufficiente, per avere comfort termoigrometrico è quella per cui la temperatura T_b si mantenga costante, ovvero quando la variazione unitaria di energia interna del corpo umano è nulla:

$$S = \frac{dU_b}{dt} = \frac{c_b m_b}{A_b} \frac{dT_b}{dt} = 0$$

Eq. 3

La potenza unitaria prodotta dal metabolismo M si può considerare funzione unicamente dell'attività svolta e viene misurata in met:

$$1 \text{ met} = 58,2 \frac{W}{m^2} = 50 \frac{kcal}{h \cdot m^2}$$

Eq. 4

1 met corrisponde alla M relativa ad una persona seduta a riposo e nel caso di attività leggera sedentaria si ha $M = 1,2$ met.

La normativa ISO 7730 [8] fornisce dei tipici valori di M in funzione del tipo di attività (Tabella 1).

| Tipici valori della potenza metabolica unitaria per diverse attività ISO 7730 | | | |
|---|---------------------------------------|-------------------|------------------|
| ATTIVITA' | | Met | W/m ² |
| RIPOSO | soggetto sdraiato dormiente | 0,7 | ~ 40 |
| | soggetto sdraiato sveglio | 0,8 | ~ 50 |
| | soggetto seduto | 1,0 | ~ 60 |
| | soggetto rilassato in piedi | 1,2 | ~ 70 |
| SEDENTARIA | in ufficio, abitazione, scuola | 1,2 | ~ 70 |
| LAVORATIVA IN UFFICIO | dattilografia, scrittura, varie | 1,2 | ~ 70 |
| LAVORATIVA IN NEGOZIO | commesso | 2 | ~ 115 |
| LAVORATIVA INDUSTRIALE | industria leggera | 1,2 ÷ 2,4 | ~ 70 ÷ 140 |
| | falegnameria a mano (chiodare ecc.) | 1,8 | ~ 105 |
| | falegnameria a macchina (forare ecc.) | 4,0 ÷ 4,8 | ~ 230 ÷ 280 |
| | industria pesante (fonderia ecc.) | 4,0 ÷ 7,6 | ~ 230 ÷ 440 |
| DOMESTICHE | cucina, lavaggio, stiratura | 1,6 ÷ 3,6 | ~ 95 ÷ 210 |
| GINNICO-SPORTIVE | ginnastica | 3,0 ÷ 4,0 | ~ 175 ÷ 230 |
| | tennis | 4,6 | ~ 270 |
| | pallacanestro | 7,6 | ~ 440 |
| | marcia | 2,4 ÷ 5,0 | ~ 140 ÷ 290 |
| | corsa | 8,0 ÷ 10,0 | ~ 465 ÷ 580 |

Tabella 1- Valori di attività metabolica

È possibile definire il rendimento meccanico del corpo umano come:

$$\eta = \frac{W}{M}$$

Eq. 5

A questo punto si può scrivere la differenza $M - W = M(1 - \eta)$

Mediamente il rendimento meccanico del corpo umano è molto basso, è di circa 0,2.

Il termine C si può esprimere come:

$$C = \frac{\dot{Q}_{convezione}}{A_b} = \frac{A_{cl}}{A_b} h_c (T_{cl} - T_a) = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)$$

Eq. 6

f_{cl} è il coefficiente di area dell'abbigliamento ed è in funzione della resistenza termica del vestito.

Nella Eq. 6 si nota la presenza di A_{cl} , che indica la superficie del corpo umano vestito, che ci fa capire come ci sia la dipendenza dal tipo di abbigliamento indossato da un individuo.

h_c è il coefficiente di scambio termico convettivo [W/(m²K)], T_{cl} è la temperatura media della superficie esterna del corpo umano vestito [K], T_a è la temperatura dell'aria ambiente [K].

La potenza termica unitaria scambiata per irraggiamento R è data da:

$$R = \frac{\dot{Q}_{irraggiamento}}{A_b}$$

Eq. 7

$\dot{Q}_{irraggiamento}$ è ricavata dalla legge di Stefan-Boltzmann per un corpo rigido e può essere espressa come:

$$\dot{Q}_{irraggiamento} = A_{efficace} \varepsilon \sigma (T_{cl}^4 - T_{mr}^4)$$

Eq. 8

Dove $A_{efficace} = A_{cl} f_{efficace}$ con $f_{efficace}$ di valore 0,696 per soggetti seduti e 0,725 per soggetti in piedi; se non si conosce la posizione si assume un valore di 0,71.

ε è l'emissività del corpo umano ($\approx 0,95$) e σ è la costante di Stefan-Boltzmann.

T_{mr} è la temperatura media radiante, per la quale si può ricorrere all'utilizzo di un globotermometro per la sua misura [20] o potremmo arrivarci ad esempio attraverso la termografia (che vedremo meglio nel seguito).

$$T_{mr} = \sqrt[4]{\frac{J_1 F_{p1} + J_2 F_{p2} + \dots + J_n F_{pn}}{\sigma}}$$

Eq. 9

Con J_n che è la radiosità della parete e F_{pn} fattore di vista tra persona e parete. Quindi, manipolando le Eq. 7, Eq. 8 e Eq. 9, si può arrivare alla seguente espressione di R (Eq. 10)

$$R = \frac{\dot{Q}_{irraggiamento}}{A_b} = \frac{A_{cl} f_{efficace} \varepsilon \sigma (T_{cl}^4 - T_{mr}^4)}{A_b} = f_{cl} f_{efficace} \varepsilon \sigma (T_{cl}^4 - T_{mr}^4)$$

Eq. 10

Se $(T_{cl} - T_{mr}) \ll \frac{(T_{cl} + T_{mr})}{2} = T_m$, si può scrivere $(T_{cl}^4 - T_{mr}^4) \approx 4T_m^3 (T_{cl} - T_{mr})$

In quasi tutti i casi la potenza termica unitaria persa per conduzione C_k è trascurabile. I tipi di contatto che possiamo avere sono:

- Pavimento-piedi
- Sedia-soggetto seduto
- Oggetto-mani individuo

Trascurando C_k , la potenza termica unitaria dispersa attraverso la pelle come calore sensibile è data dalla somma:

$$\begin{aligned} R + C &= f_{cl} h_r (T_{cl} - T_{mr}) + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) = f_{cl} (h_r T_{cl} - h_r T_{mr} + h_c T_{cl} - h_c T_a) \\ &= f_{cl} \left[(h_r + h_c) T_{cl} - (h_r + h_c) \frac{h_r T_{mr} + h_c T_a}{h_r + h_c} \right] = f_{cl} h (T_{cl} - T_{op}) \end{aligned}$$

Eq. 11

$h = h_r + h_c$ è detta adduttanza superficiale [W/(m² K)]

$T_{op} = \frac{h_r T_{mr} + h_c T_a}{h_r + h_c}$ è la temperatura operativa che è una media pesata (con h_r e h_c) tra T_{mr} e T_a .

La diffusione del vapore acqueo attraverso la pelle è indipendente dal sistema di termoregolazione (parliamo di E_d):

$$E_d = r\mu(p_{sk} - \phi \cdot p_{as})$$

Eq. 12

L'Eq. 12 è la legge di Fick.

- r è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura della pelle [J/kg]
- μ è la permeabilità della pelle alla diffusione del vapore d'acqua [kg/(s m² Pa)]
- p_{sk} è la tensione di vapore (pressione di saturazione) dell'acqua alla temperatura della pelle [Pa]
- ϕ è il grado igrometrico (umidità relativa) dell'aria ambiente [adimensionale]
- p_{as} tensione di vapore (pressione di saturazione) dell'acqua alla temperatura dell'aria ambiente [Pa]

La sudorazione (e quindi E_{sw}) consiste in varie fasi:

- Produzione di sudore (prevalentemente soluzione acquosa di cloruro di sodio) da parte delle ghiandole sudoripare (sotto il controllo dell'ipotalamo)
- il sudore arriva sulla superficie esterna della pelle attraverso appositi condotti
- il sudore forma un film sottile sulla pelle
- il sudore evapora assorbendo calore latente di vaporizzazione

Nello scambio termico per respirazione abbiamo una componente dispersa come calore latente E_{ve} (Eq. 13) e una come calore sensibile C_{ve} (Eq. 14):

$$E_{ve} = 1,72 \cdot 10^{-3} M (5867 - \phi \cdot p_{as})$$

Eq. 13

$$E_{ve} = 0,0014M(34 - \phi \cdot T_a)$$

Eq. 14

Osservando i termini notiamo che l'equazione di Fanger ha 2 variabili legate al soggetto che sono attività ed abbigliamento, 4 variabili ambientali quali temperatura, velocità e umidità dell'aria e temperatura media radiante. Abbiamo 2 variabili fisiologiche che sono la temperatura della pelle e la potenza termica dispersa per sudorazione. Queste ultime due in realtà sono collegate alle altre variabili indipendenti; quindi, possiamo definire la **condizione necessaria per il comfort** come segue:

$$f(\text{abbigliamento}, \text{attività}, T_a, w_a, \phi, T_{mr}) = 0$$

Eq. 15

Vediamo che abbiamo sei variabili indipendenti.

Altra condizione necessaria è che non si attivino i meccanismi di termoregolazione.

Secondo Fanger le ulteriori condizioni che devono essere soddisfatte sono:

$$E_{sw} = 0,42[(M - W) - 58,2]$$

Eq. 16

$$T_{sk} = 35,7 - 0,0275(M - W)$$

Eq. 17

(T_{sk} temperatura della pelle)

Quindi, in conclusione, le possibili condizioni di comfort termico sono le combinazioni delle sei variabili indipendenti che soddisfano le Eq. 15, Eq. 16 e Eq. 17.

L'indice PMV (Predicted Mean Vote) consente di prevedere il voto medio espresso dagli occupanti di un dato ambiente (Tabella 2).

| VOTO | SENSAZIONE |
|------|--------------------|
| +3 | molto caldo |
| +2 | caldo |
| +1 | leggermente caldo |
| 0 | neutro |
| -1 | leggermente freddo |
| -2 | freddo |
| -3 | molto freddo |

Tabella 2-Scala del PMV

Il PMV è correlato al carico termico, il quale ha l'espressione Eq. 18:

$$CT = (M - W) - (R^* - C^* - C_k^* - E_d^* - E_{sw}^* - E_{ve} - C_{ve})$$

Eq. 18

Dove i termini con asterisco vengono calcolati usando le Eq. 16 e Eq. 17.

Il carico termico CT ci informa su tre possibili casistiche:

- CT = 0: condizione di neutralità termica
- CT > 0: sensazione di caldo
- CT < 0: sensazione di freddo

Fanger ha elaborato una equazione che fornisce il valore del PMV in funzione del carico termico CT e della potenza metabolica unitaria M:

$$PMV = [0,303e^{-0,036M} + 0,028] \cdot CT$$

Eq. 19

Con un approccio di tipo statistico si può valutare la percentuale prevista di insoddisfatti PPD:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)}$$

Eq. 20

Per un $PMV = 0$ si ha un PPD del 5%, questo sta a significare che non è possibile avere condizioni ambientali che siano di comfort per tutti.

La normativa [8] propone come obiettivo un $-0,5 < PMV < 0,5$ che equivale ad un $PPD = 10\%$.

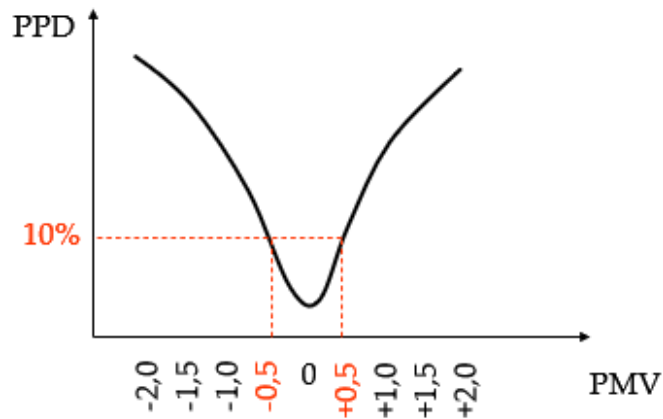


Figura 3-Relazione PMV-PPD

A supporto della determinazione del comfort termico abbiamo le normative ISO 7726 [7] e la ISO 7730 [8].

La ISO 7726 [7] si riferisce agli strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche nell'ambito della ergonomia degli ambienti termici.

Per la misura della temperatura dell'aria T_a la normativa suggerisce:

- 1) Termometri ad espansione:
 - a) Termometri ad espansione di liquido (al mercurio)
 - b) Termometri ad espansione di solido
- 2) Termometri elettrici:
 - a) Termometri a resistenza variabile
 - i) Resistori al platino
 - ii) Termistori
 - b) Termocoppie
- 3) Termomanometri (variazione della pressione di un liquido in funzione della temperatura)

Per la misura della temperatura media radiante T_{mr} in genere si utilizza il globotermometro.

L'umidità relativa ϕ può essere misurata con:

- 1) Psicrometro
- 2) Igrometro al cloruro di litio

Per la misura della velocità dell'aria w_a potremmo utilizzare:

- 1) Anemometro a filo caldo
- 2) Anemometro laser-doppler
- 3) Anemometro a sfera calda e termistori
- 4) Anemometro ad ultrasuoni

Tra gli strumenti per la misura della temperatura superficiale troviamo:

- 1) Termometri a contatto (termocoppie, resistenze)
- 2) Sensori a infrarossi

Dalla misura della temperatura superficiale di tutte le pareti di un ambiente in cui si trova un individuo, è possibile ricavare la temperatura media radiante (Eq. 9).

Dove la radiosità $J \left[\frac{W}{m^2} \right]$ è data dalla equazione:

$$J = \sigma \varepsilon T_{superficiale}^4 + (1 - \varepsilon)G$$

Eq. 21

Con G che è l'irraggiamento ricadente sulla parete $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

La [8] invece ci fornisce il metodo per la determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD.

Il PMV è funzione di 4 parametri ambientali e 2 parametri soggettivi:

$$f(I_{cl}, M, T_a, w_a, \phi, T_{mr}) = 0$$

Eq. 22

Dove:

- I_{cl} indica la resistenza termica del vestiario $\left[\frac{m^2K}{W}\right]$ ed è tabellata nella suddetta normativa
- M è l'attività metabolica $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ e possiamo trovarla anch'essa da tabella

La normativa [8] definisce dei range accettabili di PMV che tengono conto anche della vulnerabilità delle persone e al tempo di occupazione nell'ambiente, considerando che la condizione di neutralità termica la si ha per $PMV = 0$.

Chiaramente per la categoria di persone più vulnerabili avremmo un range di tolleranza più stringente e quindi più vicino allo zero rispetto le altre categorie:

- 1) Prima categoria $PMV = \pm 0,2$: spazi con requisiti speciali per persone malate, bambini e persone fragili
- 2) Seconda categoria $PMV = \pm 0,5$: nuove costruzioni e ristrutturazioni
- 3) Terza categoria $PMV = \pm 0,7$: costruzioni esistenti
- 4) Quarta categoria $PMV > \pm 0,7$: accettabile per una parte limitata dell'anno

3. Efficienza energetica di un edificio

Tematiche molto discusse oggigiorno e che costituiscono benessere per il futuro sono appunto l'efficienza energetica e il risparmio energetico. L'efficienza energetica implica l'utilizzo di tecnologie efficienti senza cambiare le proprie abitudini mentre il risparmio energetico implica cambiare le proprie abitudini ed avere una maggiore accortezza nelle proprie azioni [21].

A proposito dell'efficienza energetica, attraverso la termografia è possibile valutare lo stato attuale di efficienza energetica di un edificio. Le mappe termografiche fornite dalla camera IR assieme ai parametri ambientali mi consentono di valutare i flussi termici che attraversano gli elementi edilizi [10].

Nello specifico, una grandezza fisica utile a questo scopo, è la trasmittanza termica U che indica la potenza termica che attraversa l'involucro edilizio per unità di superficie disperdente e per unità di differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno [4]. Essa è definita come:

$$U = \frac{\dot{q}}{(T_{ai} - T_{ae})}$$

Eq. 23

La sua unità di misura è $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$. La \dot{q} indica la potenza termica specifica espressa in $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, T_{ai} e T_{ae} sono rispettivamente la temperatura dell'aria interna e la temperatura dell'aria esterna espresse in [K].

Per il territorio italiano possiamo definire diverse zone climatiche (Figura 4) e per ogni zona climatica abbiamo dei valori limite della trasmittanza termica aggiornati all'anno 2021 [16]:

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,45 | 0,40 |
| C | 0,40 | 0,36 |
| D | 0,36 | 0,32 |
| E | 0,30 | 0,28 |
| F | 0,28 | 0,26 |

Tabella 3-Trasmittanza termica strutture opache verticali

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,34 | 0,32 |
| C | 0,34 | 0,32 |
| D | 0,28 | 0,26 |
| E | 0,26 | 0,24 |
| F | 0,24 | 0,22 |

Tabella 4-Trasmittanza termica strutture opache orizzontali o inclinate di copertura

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,48 | 0,42 |
| C | 0,42 | 0,38 |
| D | 0,36 | 0,32 |
| E | 0,31 | 0,29 |
| F | 0,30 | 0,28 |

Tabella 5-Trasmittanza termica strutture opache orizzontali di pavimento

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 3,20 | 3,00 |
| C | 2,40 | 2,00 |
| D | 2,10 | 1,80 |
| E | 1,90 | 1,40 |
| F | 1,70 | 1,00 |

Tabella 6-Trasmittanza termica delle chiusure trasparenti, opache e dei cassonetti comprensivi degli infissi

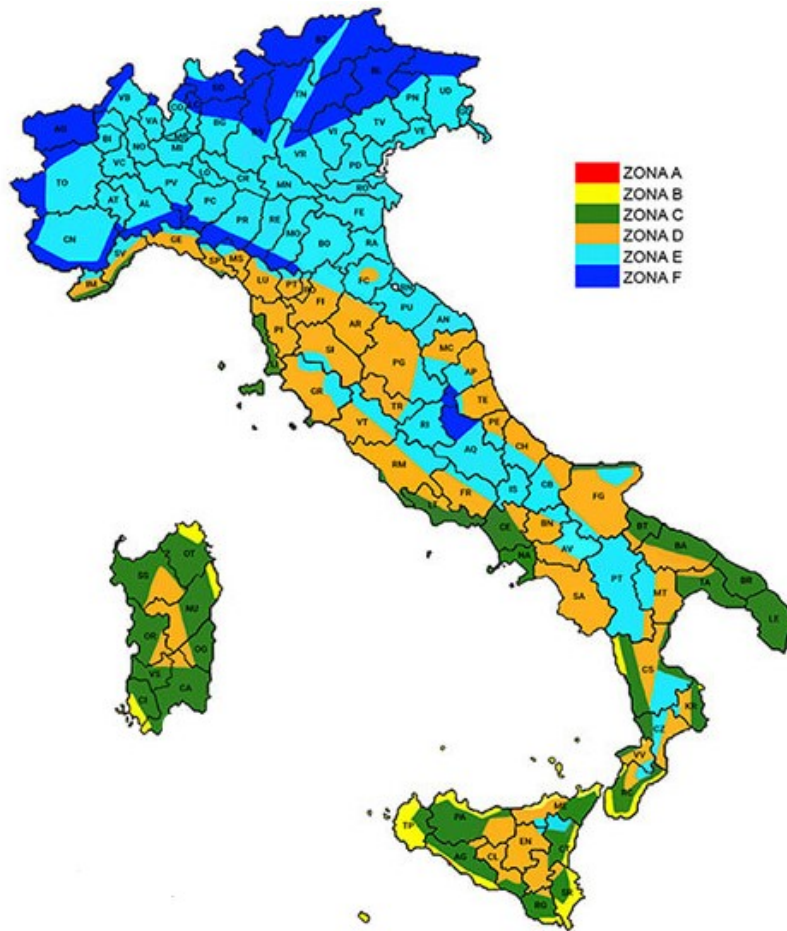


Figura 4-Zone climatiche

Da una mappa termografica siamo in grado di comprendere se su di una superficie siano presenti o meno difetti che influenzano la prestazione termica della abitazione e lo stato di benessere di un individuo all'interno di essa.

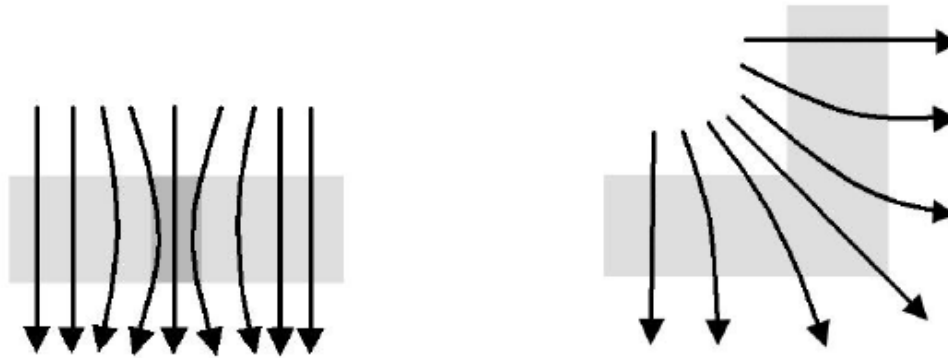
Analizzando una parete potremmo trovarci di fronte a quello che viene detto ponte termico.

I ponti termici sono punti di una costruzione che presentano flussi termici più rapidi rispetto alle parti circostanti e che provocano scambi di calore più accentuati.

In inverno il ponte termico smaltisce il calore dall'interno verso l'esterno dell'abitazione più rapidamente rispetto ad una superficie esente da ponte termico, mentre in estate veicola il calore dall'esterno all'interno provocando la necessità di una maggiore potenza raffrescante per l'ambiente interno.

Questi meccanismi generano un incremento delle perdite di calore e possono provocare, soprattutto nella stagione invernale, la diminuzione di temperatura

della superficie interna dell'edificio tale da causare rischi di condensa superficiale e quindi anche di muffe (Figura 7) [4] che possono causare problemi di salute.



Variazione di materiale

Variazione di forma

Figura 5-Ponte termico

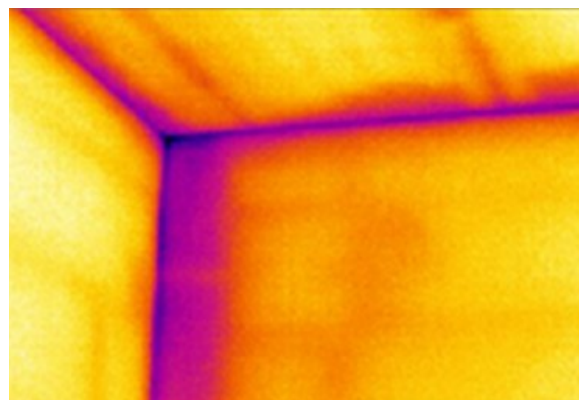


Figura 6-Mappa termografica del ponte termico



Figura 7-Muffa parete

Il ponte termico è la discontinuità di isolamento termico che si può verificare in corrispondenza agli innesti di elementi strutturali (solai e pareti verticali o pareti verticali tra loro) [17], [4].

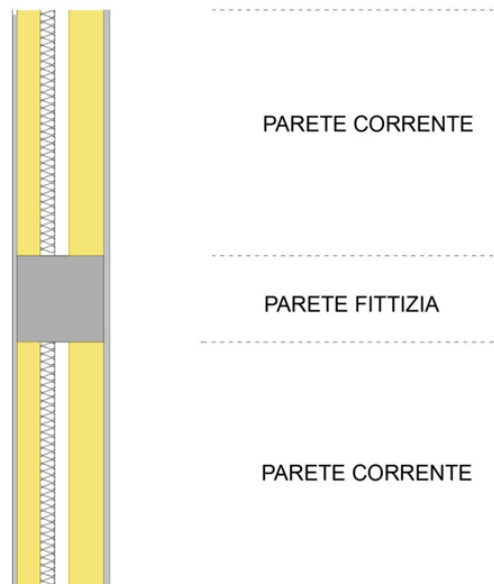


Figura 8-Definizione della parete fittizia

Come si può notare dalla Figura 8, l'area in corrispondenza del ponte termico è chiamata area fittizia (parete fittizia) mentre il resto rappresenta l'area corrente (parete corrente).

Un ponte termico si dice corretto quando la trasmittanza termica della parete fittizia non supera per più del 15 % la trasmittanza termica della parete corrente [17].

Quindi:

$$U_f \leq 1,15U_c$$

Eq. 24

Dove:

- U_f è la trasmittanza termica della parete fittizia
- U_c è la trasmittanza termica della parete corrente

U_c dovrà risultare inferiore o uguale al valore limite fornito dalle Tabella 3, Tabella 4, Tabella 5 e se vale la disuguaglianza (Eq. 24) allora il ponte termico viene definito corretto.

Abbassamenti di temperatura superficiale della parete accompagnati da determinate condizioni ambientali, possono portare ad avere dei punti a rischio condensa; nello specifico si prende a riferimento quella che è detta temperatura di rugiada: a questa temperatura, e a pressione costante, la miscela aria-vapore diventa satura di vapore acqueo. Tale temperatura di rugiada indica a che temperatura deve essere portata l'aria per far condensare in rugiada il vapore d'acqua in essa presente senza alcun cambiamento di pressione [22].

Il modello matematico di Magnus-Tetens [15] propone:

$$T_{rugiada} = \frac{b\gamma}{a - \gamma}$$

Eq. 25

Dove:

- $\gamma = \ln(U_r) + \frac{aT_{air}}{b+T_{air}}$
- T_{air} è la temperatura dell'aria [°C]
- U_r è l'umidità relativa percentuale
- $a = 17,271$
- $b = 237,7$

Qualora avessimo una temperatura superficiale della parete minore o uguale alla $T_{rugiada}$ potremmo incorrere nel rischio di formazione condensa con i vari problemi che susseguono.

4. Valutazione della trasmittanza termica in sito

Tra le tecniche più usuali per la determinazione della trasmittanza termica in sito abbiamo l'HFM (Heat Flow Meter Method) con termoflussimetro e il metodo con camera IR.

La norma ISO 9869-1:2014 [9] sfrutta come strumento principale, assieme ad altri strumenti per la misura di parametri ambientali, il termoflussimetro. Quindi per quest'ultimo la normativa fornisce linee guida per la determinazione della trasmittanza termica.

La norma ISO 9869-2:2018 [10] descrive il metodo per la determinazione della trasmittanza termica in sito tramite camera IR, quindi per mezzo della termografia e la misura di altri parametri ambientali.

4.1.HFMM (Heat Flow Meter Method)

La ISO 9869-1:2014 [9] descrive la strumentazione da utilizzare, la relativa procedura di calibrazione, l'installazione e le procedure di misurazione e l'analisi dei dati.

Vediamo quindi:

Strumentazione

Termoflussimetro (HFM)

Tale strumento fornisce un segnale elettrico in funzione del flusso di calore che lo attraversa.

In genere gli HFM sono costituiti da piastre sottili e termoresistenti. Sono caratterizzati da una bassa resistenza termica affinché la loro presenza dia perturbazioni minime al sistema ed affinché possa avere sufficiente sensibilità da poter rilevare anche piccoli flussi di calore.

La Figura 9 riporta una immagine rappresentante la sua struttura.

(Le quote si riferiscono ai millimetri)

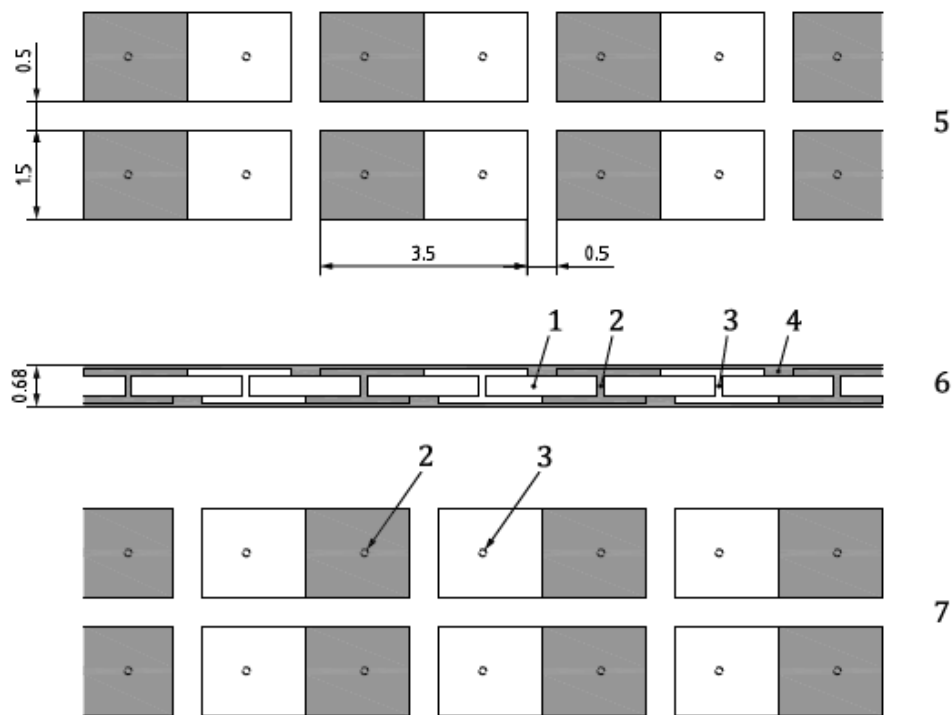


Figura 9-Struttura del termoflussimetro

1. Materiale base
2. Metallo A
3. Metallo B
4. Strato di rivestimento
5. Superficie superiore
6. Sezione trasversale
7. Superficie inferiore

Taratura dei sensori

Sensori di temperatura

I sensori di temperatura forniscono un segnale elettrico in funzione della temperatura al quale sono soggetti.

Dovranno essere tenuti in considerazione effetti disturbanti la misurazione: si dovrà tener conto del flusso termico e fenomeni come stress meccanici, radiazioni elettromagnetiche, ecc.

Tra i sensori di temperatura superficiale abbiamo termocoppie sottili e termoresistenze piatte.

I sensori di temperatura ambientale dovranno essere schermati dalla radiazione solare e termica.

Calibrazione dell'HFM

La calibrazione dell'HFM può variare a seconda della temperatura, la conducibilità termica del materiale su cui è installato e a seconda del flusso di calore stesso.

Per un nuovo tipo di HFM la calibrazione verrà eseguita con il supporto della norma ISO 8302 [13] o la ISO 8301 [14].

La procedura di taratura deve fare in modo che il fattore di taratura sia noto con una precisione di $\pm 2\%$ nelle condizioni d'uso.

Calibrazione dei sensori di temperatura

La calibrazione prevede che la differenza di temperatura tra un paio di sensori sia determinata con una accuratezza migliore del $\pm 2\%$ e la temperatura abbia una accuratezza migliore di 0,5 Kelvin. Se la differenza di temperatura è ottenuta sottraendo due temperature, allora i sensori dovranno essere tarati con una accuratezza di circa $\pm 0,1$ Kelvin.

I sensori di rilevazione della temperatura superficiale e dell'aria vengono tarati nel loro intervallo di utilizzo, che in genere è l'intervallo compreso tra i $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, confrontandoli con termometri aventi una accuratezza migliore di 0,1 Kelvin. I sensori con questa accuratezza potrebbero essere utilizzati anche senza essere calibrati.

Installazione dell'apparecchiatura

I sensori devono essere installati in modo da assicurare risultati rappresentativi dell'intero elemento esaminato.

Per quanto riguarda l'HFM può essere appropriato utilizzarne diversi e calcolarne la media dei risultati.

Gli HFM non dovranno essere posizionati vicini a ponti termici, crepe o altri difetti. Tali sensori non devono stare in prossimità di sistemi di riscaldamento, raffreddamento e vicini a ventilatori.

La superficie esterna dovrebbe essere protetta da pioggia, neve e raggi solari.

Installazione dell'HFM

La dimensione del misuratore di flusso termico dovrà essere scelta in funzione della struttura analizzata.

L'HFM deve essere montato nella zona in cui si ha una temperatura più stabile e tutta la superficie del sensore dovrà essere aderente alla parete. Affinché questo sia possibile si può utilizzare uno strato di pasta termica.

Installazione dei sensori di temperatura

Se il sensore di temperatura superficiale interna non è incorporato all'HFM, dovrà essere posizionato sotto o vicino ad esso. Il sensore di temperatura superficiale esterna sarà montato oppostamente all'HFM.

Per dei risultati accurati è bene che HFM e sensori di temperatura siano dello stesso colore ed abbiano la stessa emissività. Questo per via della esposizione alla luce solare.

Per il calcolo della trasmittanza U è necessario anche installare dei sensori di temperatura ambientale.

La durata del test può essere drasticamente ridotta se la temperatura delle superfici esterna e interna, in particolare quella interna in cui è installato l'HFM, sono stabili prima e anche durante il test.

Acquisizione dei dati

Il segnale elettrico proveniente dall'HFM e i dati acquisiti dai sensori di temperatura dovranno essere registrati continuamente o comunque ad intervalli fissati. Il periodo di tempo che intercorre tra due acquisizioni consecutive e il periodo minimo del test, dipendono da:

- Composizione dell'elemento esaminato
- Temperatura interna ed esterna
- Metodo utilizzato per l'analisi

La durata minima del test è di 72 ore se la temperatura attorno all'HFM è stabile ma può anche arrivare a superare i 7 giorni. Durante tale periodo le acquisizioni non dovranno essere interrotte.

Il tempo tra due acquisizioni successive invece dipende dal metodo utilizzato per analizzare i dati; in genere per il metodo della media il tempo è compreso tra i 30 e i 60 minuti.

Analisi ed elaborazione dei dati con il metodo della media

Con il metodo della media la trasmittanza è ottenuta dividendo la densità di flusso termico media per la differenza di temperatura media. La media deve essere presa in un periodo di tempo sufficientemente lungo.

Se la singola misurazione è indicata con l'indice j , possiamo scrivere la trasmittanza termica con l'Eq. 26:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n \dot{q}_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})}$$

Eq. 26

Dove q è la densità di flusso termico espressa in $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, T_i è la temperatura ambientale interna espressa in Kelvin e T_e è la temperatura ambientale esterna in Kelvin.

Per la resistenza termica:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n \dot{q}_j}$$

Eq. 27

Con T_{si} temperatura superficiale interna in Kelvin e T_{se} temperatura superficiale esterna anch'essa in Kelvin.

La conduttanza termica:

$$\Lambda = \frac{\sum_{j=1}^n \dot{q}_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}$$

Eq. 28

Si osserverà che i valori calcolati con le Eq. 26, Eq. 27 e Eq. 28 tenderanno a convergere ad un valore asintotico. Tali valori saranno vicini a quelli reali se:

- l'HFM non è esposto alla radiazione solare diretta
- la conduttanza termica dell'elemento è costante durante la prova.

Se queste condizioni non sono soddisfatte si possono ottenere risultati fuorvianti.

4.2. Termografia

La termografia consiste nella rilevazione delle radiazioni termiche emesse da un corpo.

Ogni corpo con temperatura superiore allo zero assoluto (0 Kelvin) emette dalla superficie onde elettromagnetiche proporzionali alla temperatura del corpo stesso [3].

Lo strumento utilizzato per rilevare la radiazione termica è detto termocamera e la radiazione termica misurata non dipende solo dalla temperatura ma anche, come si vedrà, da altri parametri ([3], [5], Eq. 41, Appendice).

Dal bilancio di potenze sul sensore della termocamera in regime stazionario:

$$E_{\text{sensore}} = E_{\text{oggetto}} + E_{\text{riflessa}} + E_{\text{atmosfera}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Eq. 29}$$

Si parte definendo la E_{oggetto} , dove l'oggetto in questione è ad esempio una parete per la quale si vuole misurare la sua temperatura.

Assumendo l'oggetto come corpo grigio, la potenza termica emessa da esso è pari a:

$$E_{\text{oggetto}} = \varepsilon_{\text{ogg}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{ogg}}^4 \cdot \tau_{\text{atm}} \quad \text{Eq. 30}$$

ε_{ogg} è l'emissività dell'oggetto, σ è la costante di Stefan-Boltzmann ed è pari a $5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$, T_{ogg} è la temperatura dell'oggetto espressa in Kelvin ed infine si ha la τ_{atm} che è la trasmissività dell'atmosfera. Quest'ultima è dovuta al fatto che la potenza emessa dall'oggetto sarà trasmessa alla termocamera attraverso l'aria ambientale che avrà una certa umidità relativa.

L'oggetto in questione riceverà, dai corpi che lo circondano, una certa potenza termica. Esso si troverà quindi a riflettere sulla termocamera una quantità pari a:

$$E_{\text{riflessa}} = \rho_{\text{ogg}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{rifl}}^4 \cdot \tau_{\text{atm}} \quad \text{Eq. 31}$$

Per σ e τ_{atm} valgono le stesse cose dette precedentemente, T_{rifl} è la temperatura riflessa (sempre in Kelvin) e ρ_{ogg} è la riflettività dell'oggetto.

Su quest'ultima si possono fare delle considerazioni. Ricordando che per un corpo opaco vale:

$$\alpha + \rho = 1 \quad \text{Eq. 32}$$

Ricavandone la riflettività:

$$\rho = 1 - \alpha \quad \text{Eq. 33}$$

Adottando un modello tale per cui $\alpha = \varepsilon$, si può scrivere:

$$\rho_{ogg} = 1 - \varepsilon_{ogg} \quad \text{Eq. 34}$$

Per cui l'espressione della $E_{riflessa}$ sarà:

$$E_{riflessa} = (1 - \varepsilon_{ogg}) \cdot \sigma \cdot T_{rifl}^4 \cdot \tau_{atm} \quad \text{Eq. 35}$$

Il contributo dell'ambiente diretto alla termocamera sarà:

$$E_{atmosfera} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \quad \text{Eq. 36}$$

Gli aeriformi sono caratterizzati da una riflettività nulla [23], per cui può essere espressa l'espressione:

$$\alpha + \tau = 1 \quad \text{Eq. 37}$$

Ipotizzando sempre $\alpha = \varepsilon$ (se l'aria non è secca $\alpha \neq 0$):

$$\varepsilon = 1 - \tau$$

Eq. 38

Quindi è possibile riscrivere $E_{atmosfera}$ come:

$$E_{atmosfera} = (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4$$

Eq. 39

Riscrivendo il bilancio di potenze:

$$E_{sensore} = \varepsilon_{ogg} \cdot \sigma \cdot T_{ogg}^4 \cdot \tau_{atm} + (1 - \varepsilon_{ogg}) \cdot \sigma \cdot T_{rifl}^4 \cdot \tau_{atm} + (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4$$

Eq. 40

In definitiva, andando a ricavare la T_{ogg} :

$$T_{ogg} = \sqrt[4]{\frac{E_{sensore} - (1 - \varepsilon_{ogg}) \cdot \sigma \cdot T_{rifl}^4 \cdot \tau_{atm} - (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4}{\varepsilon_{ogg} \cdot \sigma \cdot \tau_{atm}}}$$

Eq. 41

L'Eq. 41 conferma il fatto che la temperatura ricavata tramite termocamera dipende da diversi parametri come: l'emissività dell'oggetto in esame, dalla trasmissività della atmosfera, dalla temperatura riflessa e dalla temperatura della atmosfera (Figura 10).

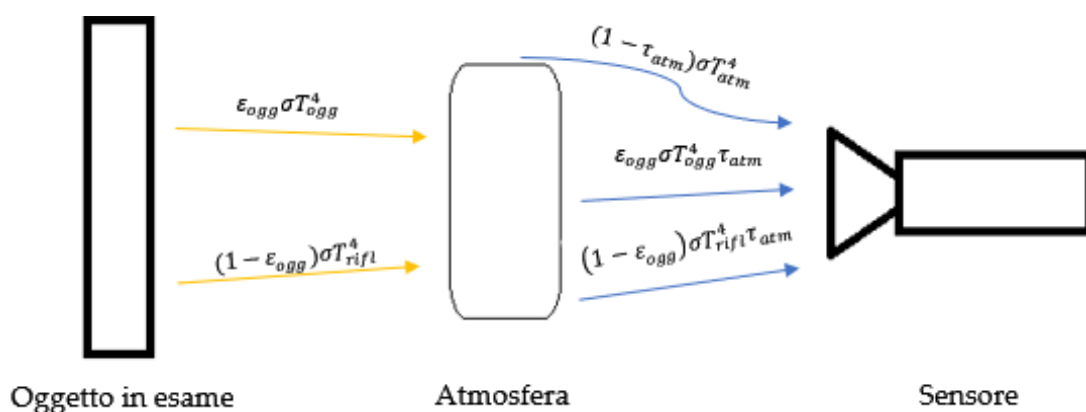


Figura 10-Misurazione temperatura superficiale con sensore IR

La termocamera è caratterizzata da [3]:

- tipologia di sensore
- campo spettrale (lunghezze d'onda a cui è sensibile)

- risoluzione (bit del convertitore analogico-digitale)
- risoluzione geometrica (numero di pixel)
- frequenza di acquisizione
- tipologia di ottica
- FOV (fattore di vista)

Tra le tipologie di sensore abbiamo i detector fotonici e i detector termici.

I detector fotonici sono composti da semiconduttori che tramite assorbimento di radiazione mi danno un certo segnale in uscita derivante da una variazione di distribuzione energetica. Hanno una risposta veloce ma per poter funzionare correttamente richiedono un raffreddamento criogenico.

I detector termici devono il loro funzionamento alla loro variazione di temperatura causata dall'assorbimento della radiazione incidente.

Il segnale elettrico di uscita è generato dalla variazione di alcune proprietà fisiche del materiale costituente il sensore.

Sono caratterizzati da una modesta sensibilità ed hanno una risposta lenta ma sono semplici da usare ed il loro punto di forza è l'economicità.

Contrariamente ai fotonici, i termici operano a temperatura ambiente.

Tra i sensori di tipo termico abbiamo i piroelettrici che rilevano una variazione nella polarizzazione spontanea interna ed i bolometri che rilevano una variazione di resistenza. I bolometri sono termistori (termoresistenze) costituite da materiale semiconduttore.

Nelle termocamere all'infrarosso sono utilizzate generalmente matrici di bolometri dette FPA (Focal Plane Arrays).

Il campo spettrale a cui operano le termocamere è appunto quello dell'infrarosso. L'infrarosso è una banda che va dalla lunghezza d'onda di dimensione $0,75 \mu\text{m}$ alla lunghezza d'onda di $1000 \mu\text{m}$.

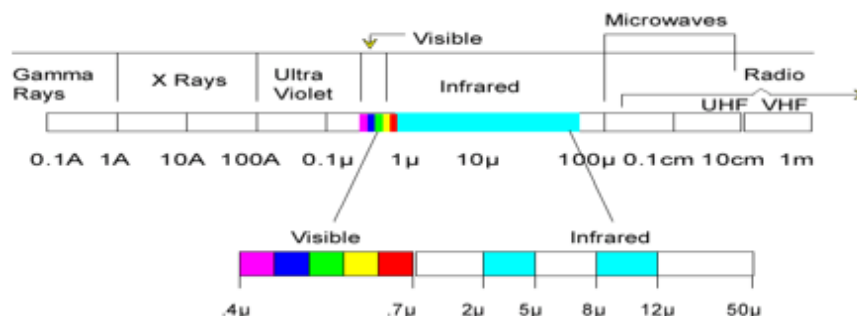


Figura 11-Campo spettrale

A sua volta la banda dell'infrarosso può essere suddivisa in bande più piccole, bande che si riferiscono alla intrinseca capacità della termocamera:

- Infrarosso vicino (0,75 – 3 μm)
- Infrarosso medio (3 – 6 μm)
- Infrarosso lontano (6 – 15 μm)
- Infrarosso estremo (15 – 1000 μm)

La risoluzione è la capacità di risolvere differenze di temperatura tra due punti adiacenti. Tale capacità dipende dalla catena di misura.

La risoluzione geometrica invece è legata dalla dimensione dei sensori.

Le caratteristiche dinamiche di una termocamera sono determinate dalla frequenza di acquisizione, frequenze che in genere vanno dai 9 ai 50 Hz.

L'ottica nella maggior parte dei casi è costituita da lenti al germanio che impediscono l'ingresso della radiazione visibile. È invece trasparente alla banda all'infrarosso, nello specifico della lente al germanio nel range che va dai 2 ai 12 micrometri.

Nella Figura 12 sono riportate le selettività di diverse tipologie di lenti:

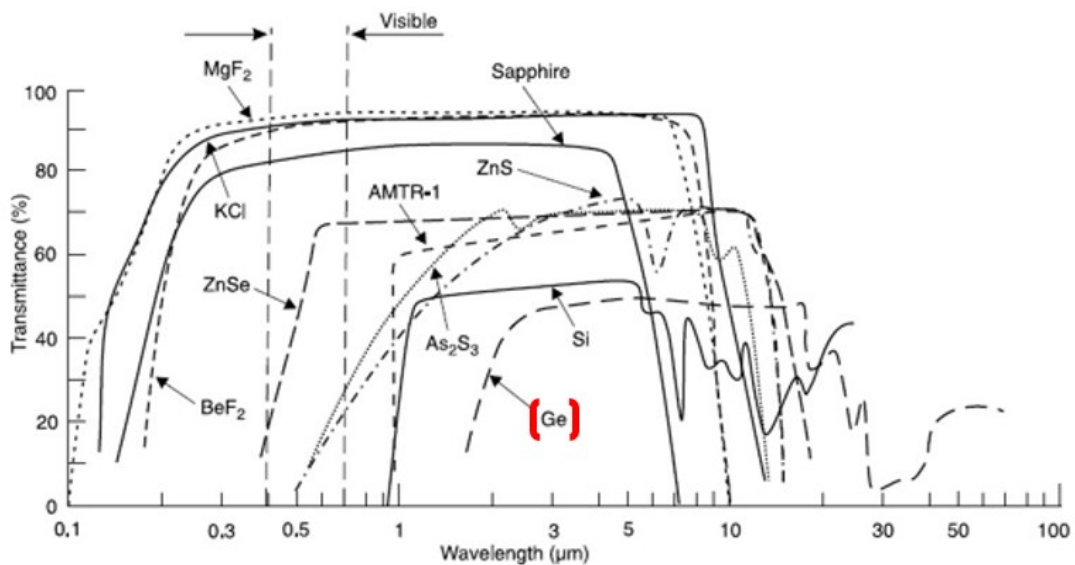


Figura 12-Selettività delle lenti delle termocamere

Nel riquadro rosso della Figura 12 vediamo riportata la lente al germanio.

Infine, il FOV (Field Of View) descrive l'area che è possibile inquadrare con la termocamera.

Il FOV (Figura 13) può essere considerato come una piramide a base rettangolare la cui base è costituita dall'area che si vuole inquadrare e il vertice è la matrice che costituisce il sensore della termocamera.

Il fattore di vista è espresso in gradi e rappresenta l'area che la termocamera è in grado di vedere in funzione della distanza (Figura 14).

La termografia può essere suddivisa in termografia attiva e termografia passiva. Nella termografia attiva si utilizza una stimolazione esterna per generare una differenza di temperatura tra misurando e ambiente esterno. A questo punto si osserva il transitorio di raffreddamento fino a che non è raggiunto l'equilibrio termico.

La termografia passiva permette di fare valutazione su di un oggetto che è a temperatura diversa da quella ambiente.

È impiegata soprattutto nei settori:

- Medicina
- Militare
- Metallurgia
- Edilizia

Focalizzando l'attenzione su quest'ultima, nell'edilizia è fondamentale l'utilizzo di una termocamera. Infatti, essa permette, assieme ad altri strumenti, di valutare ad esempio il comfort termico di un individuo all'interno di una abitazione (tramite la determinazione della temperatura media radiante [7], [8], Eq. 9), di valutare l'efficienza energetica di un edificio e di rilevare difetti nella parete dovuti ad uno scarso isolamento termico o per via del degradamento.

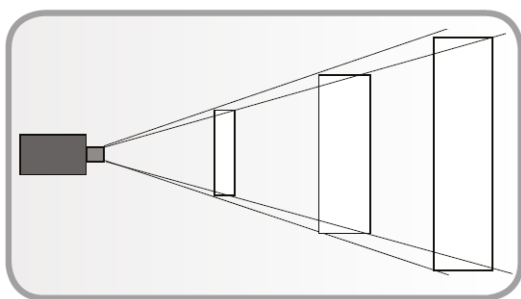


Figura 13-Piramide FOV

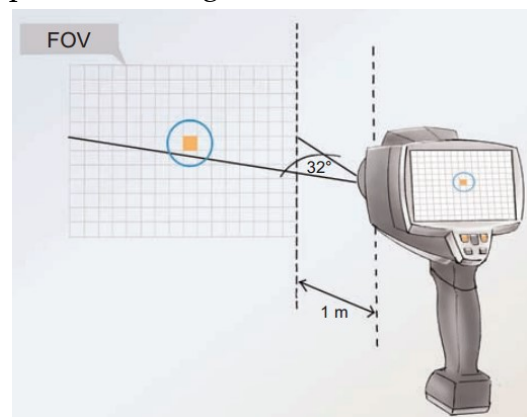


Figura 14-FOV

Nel nostro caso noi ci riferiremo alla termografia passiva ed in particolare al suo utilizzo per la determinazione della trasmittanza termica in sito con le linee guida della ISO 9869-2:2018 [10].

4.2.1. Linee guida della ISO 9869-2: 2018 per la determinazione in sito della trasmittanza termica tramite camera IR

Si parte precisando quali siano gli strumenti utili allo scopo:

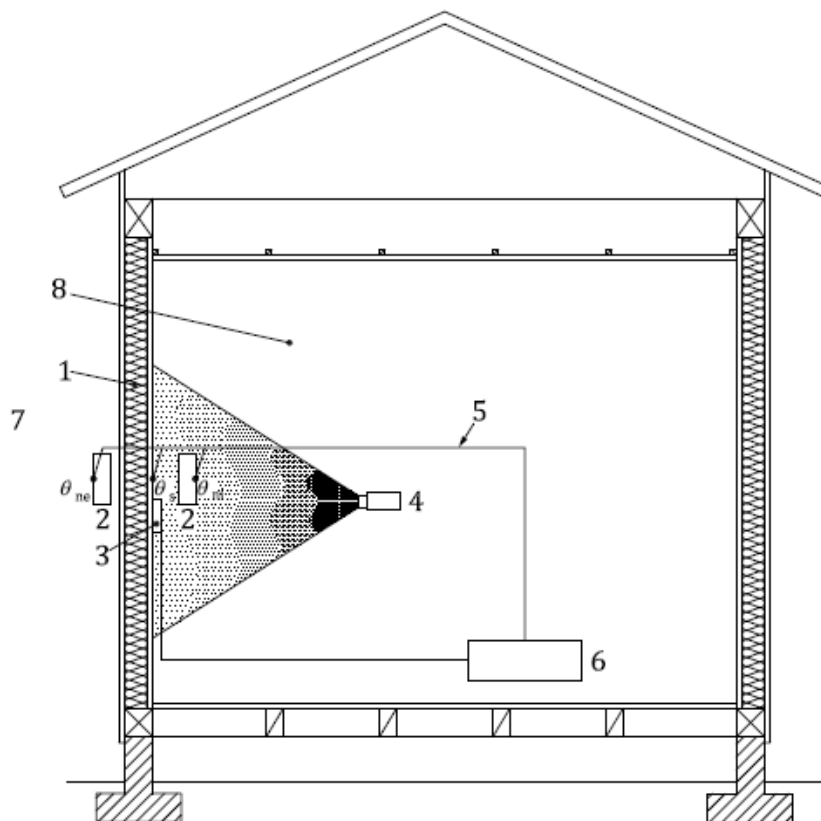


Figura 15-Strumentazione per la determinazione della trasmittanza termica tramite camera IR

1. Area in esame
2. Sensore ET
3. Sensore per la misura del coefficiente di scambio termico
4. Scanner IR
5. Termocoppia
6. Data logger
7. Ambiente esterno
8. Ambiente interno

Il sensore ET è uno strumento utile alla misura delle temperature ambientali.

L'estensione del misuratore è di circa 200x200 mm con uno spessore di 50mm. È costituito da una schiuma plastica isolante attaccata ad un foglio di rame rivestito di un colore nero opaco (con emissività maggiore di 0,9) ed una termocoppia è attaccata a questa superficie.

I dettagli costruttivi del sensore ET sono disponibili nell'allegato B della ISO 9869-2:2018 [10].

Il sensore per la misura del coefficiente di scambio termico è utilizzato per stimare il coefficiente totale di trasferimento termico della superficie in esame.

Esso è composto da un supporto in schiuma plastica ed ha un foglio in rame (rivestito di nero opaco) connesso con un termoflussimetro. Inoltre al foglio di rame è attaccata una termocoppia.

Il sensore deve avere, come misure standard, una superficie di 200x200 mm con uno spessore di 25mm.

Prima di costruire il sensore è necessario calibrare il termoflussimetro in accordo con la ISO 8301 [14] o la ISO 8302 [13] in modo da avere la giusta relazione tra output e valore effettivo della densità di flusso termico.

Si possono trovare i dettagli nell'allegato C della ISO 9869-2:2018 [10].

Lo scanner IR dovrà essere in grado di rilevare temperature comprese nell'intervallo di temperatura complessivo del corpo nero compreso tra -20 °C e 100 °C.

Il range di lunghezza d'onda misurabile dovrà essere invece compreso tra 8 μm e 13 μm (banda dell'infrarosso lontano).

La termocoppia consigliata è una termocoppia di tipo T in accordo con la IEC 60584-1 [24]. Essa è composta da un filo, di rame o di costantana, di diametro non più grande di 0,25 mm.

Se vengono usate delle termocoppie diverse dalla tipologia menzionata, bisogna assicurarsi che siano accurate allo stesso modo di quelle consigliate.

Il data logger deve registrare automaticamente i dati misurati di temperatura e del flusso di calore, con la precisione richiesta, a intervalli regolari.

Metodo di misura:

L'oggetto soggetto a misurazione deve avere una piccola capacità termica specifica, circa $30 \frac{kJ}{m^2 \cdot K}$.

Scelta area in esame:

L'area sottoposta a rilevazione dovrà essere libera, quindi non ci dovranno essere elementi che ostacolano la scansione con la termocamera, elementi come mobili, quadri, tende, ecc.

Si dovrà inoltre verificare che la superficie non sia direttamente esposta a sistemi di riscaldamento, raffreddamento e/o sistemi di ventilazione.

Condizioni di misura:

La differenza di temperatura tra interno ed esterno dovrà essere maggiore o uguale a 10°C, nella condizione di impianto di riscaldamento in funzione e che mi mantiene la temperatura ad un valore costante.

Se così non fosse si perderebbe di accuratezza nella definizione della trasmittanza termica tramite scanner IR.

Qualora la stanza sotto analisi non sia provvista di impianto di riscaldamento, è possibile utilizzare un riscaldatore elettrico con ventola purché questo mantenga le normali condizioni di esercizio del flusso di aria.

Misurazione del coefficiente di scambio termico

Il sensore del coefficiente di scambio termico è montato al centro della superficie da esaminare. Successivamente viene attivata l'alimentazione al riscaldatore elettrico del sensore e regolata in modo che la temperatura della superficie del sensore sia di 2 ÷ 4 °C superiore alla temperatura dell'aria interna della regione da misurare.

A patto che la temperatura superficiale del sensore del coefficiente di scambio termico sia stabile, si misurano:

- Temperatura superficiale del sensore misurata da una termocamera a infrarossi: T_s
- Temperatura superficiale del sensore ET misurata da una telecamera a infrarossi (temperatura ambientale: T_{ni})
- output del termoflussimetro (densità del flusso di calore: \dot{q})

Quindi il coefficiente di scambio termico totale è calcolato con la seguente:

$$h = \frac{\dot{q}}{(T_s - T_{ni})}$$

Eq. 42

Nel caso in cui le prestazioni termiche degli oggetti esaminati fossero basse, è possibile attaccare il termoflussimetro direttamente nella superficie interna e la temperatura del termoflussimetro viene misurata con uno scanner IR. A questo punto è possibile calcolare h secondo la Eq. 42.

Quando si utilizza un termoflussimetro è bene riferirsi alla normativa ISO 9869-1:2014 [9].

Misura della temperatura ambientale:

Il sensore ET è montato in prossimità del centro della superficie interna ed esterna dell'elemento in esame, ma non è attaccato.

Si misura la temperatura superficiale del sensore ET interno prima con la termocoppia e poi con lo scanner IR. Se il valore misurato con lo scanner si discosta da quello misurato con la termocoppia, si va ad aggiustare il valore di emissività della superficie misurata finché i due valori di temperatura non coincidono.

Analogamente si fa per il sensore ET esterno.

Si utilizza la temperatura ambientale misurata con camera a infrarossi per calcolare la h e \dot{Q} e si usa la temperatura misurata con la termocoppia per calcolare la differenza tra temperatura ambientale interna ed esterna.

Si suppone che vicino alla superficie ci sia una temperatura ambientale pressoché uniforme ma se così non fosse, se ci fosse un importante gradiente di temperatura, sarebbe bene dotare la parete di più sensori ET.

Distribuzione della temperatura superficiale:

Utilizzando una camera IR si trova la temperatura superficiale. Essa deve essere posizionata davanti la parete in modo che possa riprendere una immagine più ampia possibile.

Quando non è possibile riprendere l'intera area, è possibile suddividere la superficie in più sottosezioni e considerare quella che sia più rappresentativa della parete.

Si utilizza una termocoppia per misurare la temperatura superficiale e la si confronta con quella calcolata con scanner IR: si sistemerà il valore di emissività

della parete in misurazione (utile alla taratura della camera) affinché le due temperature misurate siano uguali.

Intervallo e tempo di misurazione:

La finestra temporale da considerare è quella notturna, dove non vi è la luce del sole. Nello specifico sarà necessario scegliere delle ore nel periodo che va dalle 00:00 alle 06:00.

Gli intervalli di misura dovranno essere di 30 minuti o meno e i dati relativi alla camera e alle termocoppie dovranno essere registrati e sincronizzati.

Lo scanner IR dovrà misurare:

- Temperatura superficiale della parete in esame
- Temperatura superficiale del sensore del coefficiente di scambio termico
- Temperatura superficiale del sensore ET interno

Mentre per la termocoppia:

- Temperatura superficiale del sensore del coefficiente di scambio termico
- Temperatura superficiale del sensore ET interno
- Temperatura superficiale del sensore ET esterno
- Temperatura della parete da misurare
- Temperatura dell'aria interna ed esterna

Periodo di misura:

Il periodo di misurazione dovrà essere di almeno tre giorni consecutivi.

Qualora non fosse possibile acquisire misure per tre giorni consecutivi è accettabile l'acquisizione di un solo giorno. In questo caso si dovrà fare maggiore attenzione alle condizioni di misura, in particolare a variazioni del tempo e a variazioni di temperatura della stanza. Bisognerà avere una condizione quanto più possibile quasi-statica.

Calcoli

La termografia ci fornisce una mappa di temperature dell'area in esame e di queste temperature superficiali andremo a ricavarne il valore medio.

La potenza termica che attraversa la parete sarà appunto data dalla temperatura superficiale media, dal coefficiente di scambio termico totale misurato e dalla temperatura ambientale interna:

$$\dot{Q} = h(T_{ni} - T_s)A$$

Eq. 43

Il coefficiente di scambio termico totale, nel caso di ambienti interni in cui si parla di convezione naturale, può essere anche preso dalla Tabella 7:

Dimensions in W/(m²K)

| Surface | Direction of heat flow | | |
|----------|------------------------|------------|-----------|
| | Upwards | Horizontal | Downwards |
| Internal | 10 | 7,7 | 5,9 |

NOTE The radiative heat transfer coefficient, h_r , is not depended in the direction of heat flow, but is set to 5,1 W/(m²K) as fixed. This value is calculated for emissivity of the surface to 0,9, and evaluated the mean temperature of an internal surface as 20 °C. The value of h refer to ISO 6946.

Tabella 7-Valori del coefficiente di scambio termico totale

Si è ora in grado di calcolare la trasmittanza termica tramite la relazione:

$$U = \frac{\dot{Q}}{(T_{ni} - T_{ne})A}$$

Eq. 44

Dove T_{ne} è la temperatura ambientale esterna.

Si calcola quindi la media dei valori di trasmittanza termica misurati consecutivamente per tre giorni e si trova così la trasmittanza termica della parete in esame.

5. Comfort Eye

Il Comfort Eye [19] è un dispositivo multi-sensore IoT nato per la misura in tempo reale delle condizioni di comfort, in termini di comfort termico e qualità interna dell'aria, negli edifici. In particolare, ci fornisce il Predicted Mean Vote (PMV), che è una scala di comfort secondo la ISO 7730 [8] come visto nel capitolo "Comfort termico", e la temperatura media radiante.

La strumentazione è composta essenzialmente da due nodi di cui uno misura la temperatura delle pareti (posizionato sul soffitto) e l'altro parametri ambientali quali l'umidità relativa, la temperatura dell'aria, la concentrazione di CO₂ e la concentrazione di materiale particolato (PM) [5].

I nodi del sistema, i quali acquisiscono dati relativi alle quantità misurate, comunicano tramite Wi-Fi con il gateway. Questo è collegato ad un server, tramite connessione internet, al quale vengono mandati i dati.

I dati nel server, dopo essere stati corretti e processati, saranno salvati in un database, operazione che mi consente di prelevarli ed elaborarli.

Ceiling Node



Figura 16-Ceiling Node (Scanner IR)

Questo mostrato in Figura 16 è lo strumento posizionato sul soffitto (scanner IR) che misura la temperatura delle pareti. È dotato di sensori di temperatura a

infrarossi e di motori che permettono una rotazione verticale ed una rotazione orizzontale.

Queste rotazioni permettono l'intera scansione di una stanza.

È importante che il nodo in questione abbia un modulo Wi-Fi per poter inviare dati al gateway.

Nello specifico, per quanto riguarda il sistema di scansione a IR, si ha una sequenza 4x16 di termopile che corrispondono quindi a una matrice 4x16 di valori di temperatura.

Il FOV (fattore di vista) è definito da $\varphi_h = 60^\circ$ e $\varphi_v = 16^\circ$.

Da questi angoli e nota la distanza "d" tra il sensore e la parete in esame, si possono calcolare la lunghezza orizzontale e la lunghezza verticale che mi danno l'area inquadrata per ogni scansione:

$$L_h = d \cdot \left[\operatorname{tg} \left(\theta_h + \frac{\varphi_h}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\theta_h - \frac{\varphi_h}{2} \right) \right]$$

Eq. 45

$$L_v = d \cdot \left[\operatorname{tg} \left(\theta_v + \frac{\varphi_v}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\theta_v - \frac{\varphi_v}{2} \right) \right]$$

Eq. 46

Dove θ_h e θ_v sono, rispettivamente, l'inclinazione orizzontale e l'inclinazione verticale del sensore.

Per poter fare una scansione completa delle 4 superfici verticali più il pavimento, lo scanner, ruotando attorno ai due assi, deve compiere in totale 21 rilevazioni.

La rotazione attorno all'asse verticale ha 4 posizioni di blocco, una ogni 90° .

Il movimento attorno all'asse orizzontale genera scansioni verticali ad intervalli di 15° .

Arriveremo ad avere, alla fine della scansione completa, 5 matrici di temperature.

Si tenga presente che la modalità di scansione potrebbe variare al variare della geometria della stanza in esame.

Correzione delle matrici di temperatura

Affinché si abbiano valori rappresentativi di temperatura degli oggetti in esame è bene mettere in atto delle correzioni. Sono correzioni fisiche e correzioni geometriche.

Per le correzioni fisiche ci riferiamo alla Eq. 41.

Idealizzando il sensore dello scanner IR come un corpo nero, possiamo scrivere:

$$E_{sensore} = \sigma \cdot T_{sensore}^4 \quad Eq. 47$$

Inserendola nella equazione Eq. 41:

$$T_{ogg} = \sqrt[4]{\frac{\sigma \cdot T_{sensore}^4 - (1 - \varepsilon_{ogg}) \cdot \sigma \cdot T_{rifl}^4 \cdot \tau_{atm} - (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4}{\varepsilon_{ogg} \cdot \sigma \cdot \tau_{atm}}} \quad Eq. 48$$

Semplificando la costante di Stefan-Boltzmann in tutta la equazione, otteniamo:

$$T_{ogg} = \sqrt[4]{\frac{T_{sensore}^4 - (1 - \varepsilon_{ogg}) \cdot T_{rifl}^4 \cdot \tau_{atm} - (1 - \tau_{atm}) \cdot T_{atm}^4}{\varepsilon_{ogg} \cdot \tau_{atm}}} \quad Eq. 49$$

Per cui, per ogni valore all'interno della matrice di temperatura di ogni parete, si avrà che la T_{ogg} sarà funzione della emissività dell'oggetto ε_{ogg} , della trasmissività atmosferica τ_{atm} , della temperatura del sensore $T_{sensore}$, della temperatura riflessa T_{rifl} e della temperatura atmosferica T_{atm} .

Essendo la trasmissività τ_{atm} degli aeriformi prossima al valore 1, si può in conclusione scrivere:

$$T_{ogg} = \sqrt[4]{\frac{T_{sensore}^4 - (1 - \varepsilon_{ogg}) \cdot T_{rifl}^4}{\varepsilon_{ogg}}} \quad Eq. 50$$

La temperatura riflessa T_{rifl} nella Eq. 50 è riferita alla temperatura della superficie opposta alla superficie in esame. La temperatura riflessa viene calcolata misurando direttamente il contributo della superficie opposta con un'emissività impostata al valore 1. Poiché il sensore IR è installato a soffitto, la sua inclinazione potrebbe influenzare l'accuratezza della procedura di misurazione a causa della variazione di emissività in relazione all'angolo di vista. Tuttavia, considerando che per scansionare pareti verticali viene raggiunto un angolo massimo di 45° , per la maggior parte dei materiali da costruzione l'emissività non cambia in quel range di inclinazioni.

Le correzioni geometriche sono necessarie dal momento in cui l'area scansionata non coincide con quella effettiva delle pareti.

Si necessitano due tipi di correzione dovuti a:

- Scansioni di aree non appartenenti alla superficie interessata (sia orizzontalmente che verticalmente)
- Sovrapposizione di rilevazioni consecutive ma appartenenti alla stessa superficie

Correzione di parti non appartenenti alla superficie di interesse:

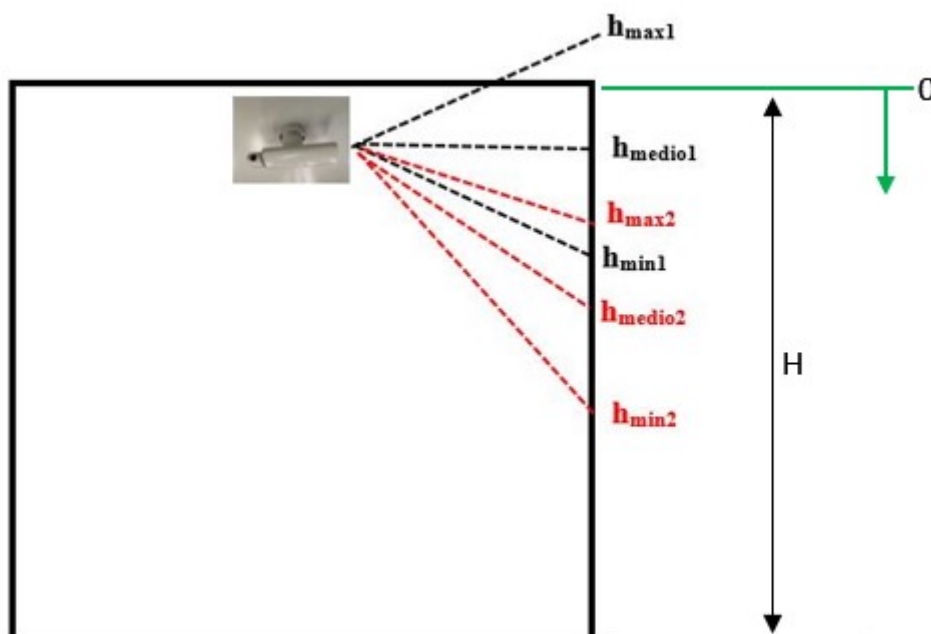


Figura 17-Rilevazioni del Ceiling Node

Consideriamo la prima parete verticale per la quale si inizia a scannerizzare dal punto più in alto.

In prima istanza si calcolano le lunghezze effettivamente misurate per ogni scansione; quindi, si calcolano la lunghezza orizzontale (L_h) con l'Eq. 45 e verticale (L_v) con l'Eq. 46.

Verifica verticale: fissando un sistema di riferimento che ha come zero il punto più alto della parete misurata (Figura 17), si definiscono: la posizione del punto più alto h_{max} , la posizione del punto più basso h_{min} e la posizione del punto medio h_{medio} di ogni scansione.

Si calcola l'altezza dei pixel, chiamata $step_v$, ottenuta come L_v diviso 4 (ricordando che lo scanner IR è costituito da una matrice di 4 righe per 16 colonne di termopile).

Note queste informazioni si può eseguire la correzione.

Con l'ipotesi che h_{max} della prima scansione sia minore di zero, si calcola il numero di righe da eliminare attraverso la Eq. 51:

$$row_{del-ceiling} = \left\lfloor \frac{h_{max(1)}}{step_{v(1)}} \right\rfloor$$

Eq. 51

Nel caso in cui questo sia un numero maggiore di zero verrà eliminato un numero di righe, partendo dall'alto, pari al valore di $row_{del-ceiling}$.

Ovviamente se h_{max} coincidesse esattamente con il riferimento zero non ci sarebbe alcuna riga da eliminare.

Il ragionamento è lo stesso per eliminare le eventuali righe del pavimento: si considera l'ultima scansione e, chiamando r quest'ultima, se $h_{min(r)}$ è più in basso rispetto ad H (che è l'altezza della parete) il valore di $row_{del-floor}$ è il seguente:

$$row_{del-floor} = \left\lfloor \frac{h_{\min(r)} - H}{step_v(r)} \right\rfloor$$

Eq. 52

L'eliminazione di righe avverrà a partire dal basso e ne verranno eliminate in numero pari al risultato dell'Eq. 52.

Anche qui, se $h_{\min(r)}$ coincidesse con H , $row_{del-floor} = 0$ e non ci sarebbe nessuna riga da eliminare.

Verifica orizzontale: essendo la lunghezza L_h simmetrica rispetto al sensore, vengono calcolate le differenze tra $L_h/2$ e la distanza dalla parete precedente ($L_{diff-prev}$) e da quella successiva ($L_{diff-next}$).

La larghezza dei pixel è ottenuta dividendo L_h per sedici ($step_h$).

Nel caso in cui le differenze fossero negative, si calcolano le colonne da eliminare facendo l'approssimazione del risultato della Eq. 53 (valida sia per la parete precedente che successiva):

$$column_{del} = \left\lfloor \frac{L_{diff}}{step_h} \right\rfloor$$

Eq. 53

E anche in questo caso se $L_{diff} = 0$ non ci saranno colonne da eliminare.

Correzione di aree sovrapposte:

Verticalmente ogni parete è composta dalla somma di più scansioni. Essendo il FOV del Comfort Eye caratterizzato da un $\varphi_v = 16^\circ$ ed essendo lo spostamento tra una rilevazione e l'altra di 15° , si viene a creare sovrapposizione tra due misurazioni successive ($h_{\max2} - h_{\min1}$ nella Figura 17).

Sottraendo all' h_{\min} di una scansione l' h_{\max} di quella successiva si trova l'ampiezza della sovrapposizione (overlap). Attraverso l'Eq. 54 si calcola la porzione di pixel che si sovrappone (row_{overlap}):

$$row_{\text{overlap}(n)} = \frac{\text{overlap}_{(n)}}{\frac{\text{step}_{v(n)} + \text{step}_{v(n+1)}}{2}}$$

Eq. 54

Nel caso questo valore fosse maggiore di 0,5 pixel, viene fatta una media dei valori tra le due righe coinvolte e queste vengono sostituite proprio dal risultato di questa operazione. Questo genera un problema se si vuole automatizzare il procedimento (attraverso la scrittura di un codice) poiché andando a sostituire due righe della matrice di temperatura con una sola, gli indici con i quali queste vengono riconosciute cambiano e ciò porterebbe a prendere righe che non sono soggette a sovrapposizione.

Per ovviare al problema, ogni volta che bisogna compiere le suddette operazioni di correzione, viene aggiunta una riga composta solo da zeri della stessa lunghezza di quelle già esistenti in modo da lasciare invariati gli indici delle righe.

Arrivati alla fine della correzione della sovrapposizione vengono poi eliminate tutte le righe composte solo da zeri.

Le matrici di temperatura ottenute hanno bassa risoluzione poiché mediamente si hanno matrici di dimensione 16x16.

Per migliorarne la risoluzione si può applicare una funzione di interpolazione, sempre attraverso la scrittura di un codice in Python, di tipo 'bicubic'.

Desk Node



Figura 18-Desk Node

Il dispositivo mostrato in Figura 18 ha la funzione di misurare quelli che sono i parametri ambientali e la qualità dell'aria.

Nello specifico i sensori al suo interno sono in grado di misurare:

- Temperatura dell'aria;
- Umidità relativa;
- Concentrazione di CO₂;
- Concentrazione di materiale particolato (PM)
- Luminosità.

Come lo scanner IR, anche questo nodo necessita di un modulo Wi-Fi per poter comunicare con il gateway.

Gateway

Il Gateway è un dispositivo atto alla comunicazione tra due reti, è una porta che permette appunto il passaggio di dati da una rete all'altra [18].

Nel nostro caso [5] il Gateway opererà tra la rete dei nodi, quindi prendendo dati dallo scanner IR e dal nodo delle misure ambientali, e la rete del server. In quest'ultimo i dati verranno inviati ogni 15 minuti e verranno poi qui processati.

L'utilizzo di tale dispositivo diventa indispensabile visto che le due reti non parlano lo stesso linguaggio, ovvero non utilizzano lo stesso protocollo di comunicazione; perciò, il compito principale di un gateway è quello di tradurre diversi protocolli di comunicazione e formati di dati che possono essere molto diversi tra di loro.

Dal momento che spesso le due reti a cui si unisce un gateway usano protocolli diversi, il gateway opera in modo da facilitarne la compatibilità.

Il Comfort Eye è dotato nello specifico di un sistema basato sul RaspBerry Pi 3, un gateway commerciale. Questo, per poter funzionare, ha bisogno di una connessione Internet attraverso la rete locale oppure un router 4G.

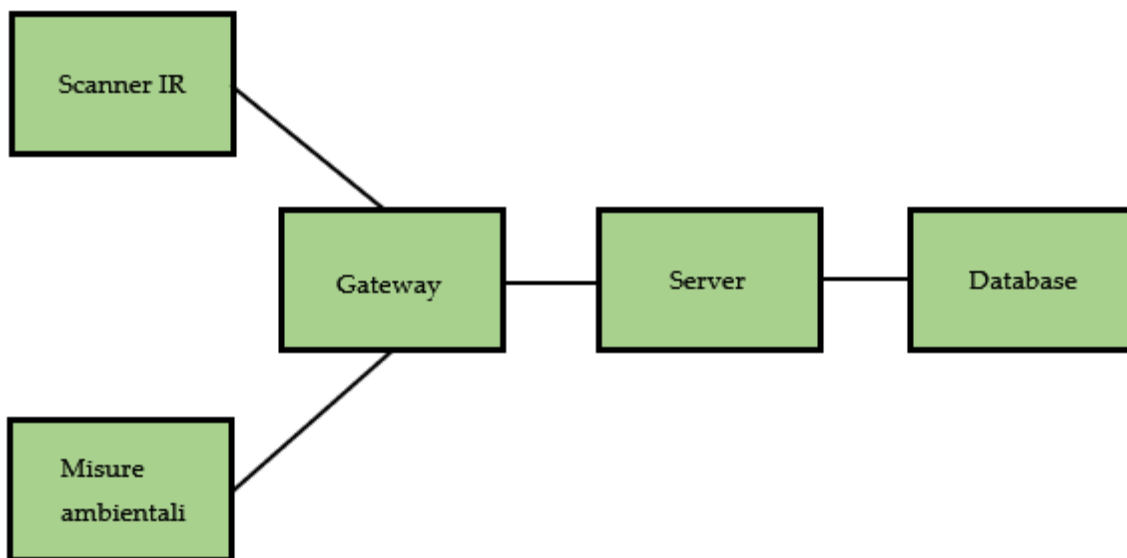


Figura 19-Comunicazione tra reti

6. Proposta del Comfort Eye per la determinazione della trasmittanza termica

La proposta è quindi quella di utilizzare l'altissimo potenziale del dispositivo multi-sensore IoT come alternativa alla termocamera nella determinazione della trasmittanza termica U.

Abbiamo visto come, da normativa ISO 9869-2: 2018 [10], la termocamera venga utilizzata per determinare la trasmittanza termica in sito: sono previsti essenzialmente strumenti per la misura dei parametri ambientali ed una camera IR a postazione fissa per esaminare una singola parete per volta. È chiaro che, con questa metodologia, è possibile acquisire dati per un periodo di tempo limitato qualora, ad esempio, la zona esaminata fosse abitata.

Con il Comfort Eye si propone un sistema poco invasivo grazie ad uno scanner IR installato a soffitto ed un modulo compatto per la misura dei parametri ambientali, rendendolo sicuramente non di disturbo per la normale abitabilità delle persone all'interno dell'ambiente. Si offre quindi una soluzione che valuti contemporaneamente sia il comfort dell'individuo, a livello di comfort termico e qualità dell'aria interna (IAQ), che l'efficienza energetica della costruzione, tutto in tempo reale.

L'acquisizione dati continuativa ed in tempo reale è importante per poter agire repentinamente in caso di basso grado di salubrità dello spazio abitato ma anche per rilevare e correggere eventuali degradamenti dell'involucro edilizio che comportano anch'essi problemi per la salute dell'uomo ma anche una diminuzione della efficienza energetica.



Figura 20-Installazione del Comfort Eye

Ciò che è rappresentato nella Figura 20 è l'installazione del Comfort Eye in un edificio a Gdynia, Polonia. Possiamo notare, come già accennato, che il sistema è compatto e non è di disturbo per le persone che vivono la stanza.

7. Modelli matematici applicati

7.1. Modelli matematici applicati al Comfort Eye

Lo scopo principale di questo elaborato, come anticipato, è la determinazione della trasmittanza termica che ricordiamo ha la seguente espressione:

$$U = \frac{\dot{q}_{cond}}{(T_{ai} - T_{ae})}$$

Eq. 55

- T_{ai} è la temperatura dell'aria interna in Kelvin
- T_{ae} la temperatura dell'aria esterna in Kelvin
- \dot{q}_{cond} è la potenza termica specifica che attraversa la parete espressa in $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

Nell'ipotesi di regime stazionario (flusso termico costante) è possibile esprimere l'espressione della potenza termica specifica che attraversa la parete in questo modo:

$$\dot{q}_{cond} = \dot{q}_{irr} + \dot{q}_{conv}$$

Eq. 56

- \dot{q}_{irr} è la potenza specifica scambiata per irraggiamento $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
- \dot{q}_{conv} è la potenza specifica scambiata per convezione $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

Sono stati ricavati i modelli matematici per la determinazione delle due potenze specifiche appena introdotte nella Eq. 56 [11]:

$$\dot{q}_{irr} = h_r(T_{ai} - T_{si})$$

Eq. 57

Dove T_{si} è la temperatura superficiale della parete interna in kelvin e T_{ai} è la temperatura dell'aria interna anch'essa in Kelvin. h_r in $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ è il coefficiente di scambio termico radiativo che può essere espresso dalla Eq. 58.

$$h_r = \frac{\varepsilon \sigma (T_{ai}^4 - T_{si}^4)}{(T_{ai} - T_{si})}$$

Eq. 58

σ è la costante di Stefan-Boltzmann che vale $5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ mentre ε è l'emissività della parete per la quale si è preso un valore di $\varepsilon = 0,96$ per una parete intonacata [12].

Per il termine relativo alla potenza specifica scambiata per convezione:

$$\dot{q}_{conv} = h_c (T_{ai} - T_{si})$$

Eq. 59

In cui h_c è il coefficiente di scambio termico convettivo in $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ per il quale viene proposta la seguente equazione [11]:

$$h_c = C (T_{ai} - T_{si})^n$$

Eq. 60

Eq. 60 valida per il caso di convezione naturale che è il caso aderente alla realtà. Inoltre considerando che da normativa ISO 9869-2: 2018 [10], che ci fornisce linee guida per la determinazione della trasmittanza termica in sito tramite camera IR, l'acquisizione dati deve essere eseguita su pareti che non siano direttamente a contatto con sistemi di ventilazione meccanica e allora a maggior ragione l'ipotesi di convezione naturale è corretta.

Le costanti C ed n assumono valori diversi a seconda della proposta di diversi autori che vediamo nella Tabella 8:

| AUTORI | hc [W/(m²K)] |
|----------------|--------------------------------|
| Awbi et al. | $1.49 \times \Delta T^{0.345}$ |
| Khalifa et al. | $2.07 \times \Delta T^{0.230}$ |
| Michejev | $1.55 \times \Delta T^{0.330}$ |
| King | $1.51 \times \Delta T^{0.330}$ |
| Nusselt | $2.56 \times \Delta T^{0.250}$ |
| Heilman | $1.67 \times \Delta T^{0.250}$ |
| Wilkens et al. | $3.04 \times \Delta T^{0.120}$ |

| | |
|----------|--------------------------------|
| ASHRAE | $1.31 \times \Delta T^{0.330}$ |
| ISO 9869 | 3.00 |

Tabella 8-Modelli matematici di hc

Sempre dalla normativa ISO 9869-2:2018 [10], poiché verranno acquisiti dati per almeno 72 ore nelle ore notturne di ogni giornata comprese tra le 00:00 e le 06:00 e ne avremo quindi una quantità elevata, arriviamo ad un valore rappresentativo della trasmittanza termica U con il metodo della media:

$$U_{Comfort Eye} = \sum_{i=1}^N \frac{\dot{q}_{cond_i}}{(T_{ai} - T_{ae})_i} \quad Eq. 61$$

Avremo quindi N dati campionati di trasmittanza termica riferiti ad un preciso istante di tempo.

7.2.Modelli matematici applicati al termoflussimetro

Prima di determinare la trasmittanza termica da termoflussimetro U_{HFM} si valuta la conduttanza termica media con la Eq. 62, passaggio utile a definire l'accuratezza dei dati misurati.

$$\Lambda = \frac{\sum_{i=1}^n Hfwall_i}{\sum_{i=1}^n (T_{wall_in_i} - T_{wall_out_i})} \quad Eq. 62$$

Dove $Hfwall$ è il flusso termico specifico misurato con termoflussimetro $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ e T_{wall_in} e T_{wall_out} sono rispettivamente la temperatura superficiale della parete interna e la temperatura superficiale della parete esterna espresse entrambe in Kelvin.

Per determinare la trasmittanza termica U_{HFM} ci si serve della Eq. 63, sempre con il metodo della media:

$$U_{HFM} = \frac{\sum_{j=1}^n Hfwall_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ai} - T_{ae})_j} \quad Eq. 63$$

Dove anche qui ovviamente, come per la Eq. 61, T_{ai} e T_{ae} sono la temperatura dell'aria interna ed esterna espresse in Kelvin.

8. Validazione del Comfort Eye nella determinazione della trasmittanza termica

Per validare il Comfort Eye nella determinazione della trasmittanza termica è stata analizzata una parete della biblioteca San Giovanni di Pesaro. Lo studio si concentra sulla parete opaca e non sulla parete vetrata, quest'ultima esula dal presente elaborato per via della più complicata trattazione che richiede uno studio dedicato.



Figura 21-Caso di studio: Biblioteca San Giovanni, Pesaro

Dalla Figura 21 vediamo che, come da norma ISO 9869-1: 2014 [9], vi è la strumentazione per l'HFMM (Heat Flow Meter Method) la quale prevede l'utilizzo del termoflussimetro per la misura della densità di flusso termico. La trasmittanza termica determinata con termoflussimetro U_{HFMM} costituirà il riferimento per validare la trasmittanza termica determinata mediante Comfort Eye U_{CE} .

Per poter confrontare misure coerenti riferite alla stessa zona, il Comfort Eye dovrà acquisire dati relativi alla stessa zona di misura dell'HFMM; dal ceiling node verrà preso il pixel della mappa termografica corrispondente al riquadro rosso nella Figura 21.

8.1. Determinazione di U_{HFM}

Dal database verranno estratti i seguenti dati corrispondenti al periodo che va dal 1 gennaio 2020 al 17 gennaio 2020:

| date | Hfwall | RTD | Tair_out | Twall_in | Twall_out |
|------------------|-----------|--------|----------|----------|-----------|
| 01/01/2020 00:00 | 10,451883 | 20,877 | 3,849 | 17,82 | 3,493 |
| 01/01/2020 00:01 | 10,087407 | 20,876 | 4,54 | 17,828 | 3,436 |
| 01/01/2020 00:02 | 10,372119 | 20,883 | 4,425 | 17,804 | 3,488 |
| 01/01/2020 00:03 | 10,333479 | 20,892 | 4,154 | 17,815 | 3,445 |
| 01/01/2020 00:04 | 10,626436 | 20,891 | 4,463 | 17,795 | 3,371 |
| 01/01/2020 00:05 | 10,261944 | 20,88 | 3,717 | 17,815 | 3,456 |
| 01/01/2020 00:06 | 10,338851 | 20,873 | 4,216 | 17,815 | 3,351 |
| 01/01/2020 00:07 | 10,181646 | 20,862 | 4,122 | 17,823 | 3,379 |
| 01/01/2020 00:08 | 10,388575 | 20,863 | 4,005 | 17,809 | 3,416 |
| 01/01/2020 00:09 | 10,331337 | 20,857 | 4,053 | 17,812 | 3,365 |
| 01/01/2020 00:10 | 10,505355 | 20,856 | 4,059 | 17,823 | 3,402 |
| 01/01/2020 00:11 | 10,580461 | 20,85 | 4,362 | 17,826 | 3,416 |
| 01/01/2020 00:12 | 10,328124 | 20,848 | 4,022 | 17,806 | 3,399 |
| 01/01/2020 00:13 | 10,442227 | 20,847 | 4,218 | 17,801 | 3,436 |
| 01/01/2020 00:14 | 10,220107 | 20,849 | 3,516 | 17,82 | 3,322 |
| 01/01/2020 00:15 | 10,533431 | 20,848 | 4,262 | 17,809 | 3,317 |
| 17/01/2020 23:46 | 8,107449 | 21,565 | 8,407 | 18,787 | 6,586 |
| 17/01/2020 23:47 | 7,997631 | 21,563 | 8,255 | 18,801 | 6,62 |
| 17/01/2020 23:48 | 7,963827 | 21,563 | 8,352 | 18,809 | 6,603 |
| 17/01/2020 23:49 | 7,954706 | 21,56 | 7,634 | 18,79 | 6,6 |
| 17/01/2020 23:50 | 8,253197 | 21,56 | 7,747 | 18,781 | 6,648 |
| 17/01/2020 23:51 | 8,225122 | 21,562 | 8,18 | 18,781 | 6,632 |
| 17/01/2020 23:52 | 8,063989 | 21,564 | 8,124 | 18,787 | 6,602 |
| 17/01/2020 23:53 | 8,004073 | 21,558 | 8,164 | 18,784 | 6,616 |
| 17/01/2020 23:54 | 8,077572 | 21,555 | 8,055 | 18,779 | 6,641 |
| 17/01/2020 23:55 | 8,656134 | 21,561 | 8,038 | 18,787 | 6,647 |
| 17/01/2020 23:56 | 8,50912 | 21,554 | 7,906 | 18,784 | 6,635 |
| 17/01/2020 23:57 | 7,840782 | 21,552 | 8,044 | 18,773 | 6,703 |
| 17/01/2020 23:58 | 8,30667 | 21,548 | 8,596 | 18,809 | 6,661 |
| 17/01/2020 23:59 | 8,062545 | 21,546 | 8,257 | 18,79 | 6,736 |

Figura 22-Database

Notiamo che per ogni minuto abbiamo la misura di:

- Hfwall, ovvero il flusso termico che attraversa la superficie opaca $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ in una precisa zona della parete (riquadro rosso nella Figura 21) ottenuta da termoflussimetro
- RTD, la temperatura dell'aria interna [°C]
- Tair_out, la temperatura dell'aria esterna [°C]
- Twall_in, la temperatura della superficie interna [°C]
- Twall_out, la temperatura della superficie esterna [°C]

La ISO 9869-1: 2014 [9] e la ISO 9869-2:2018 [10] stabiliscono l'acquisizione di dati per un periodo di almeno 72 ore in delle fasce comprese tra le 00:00 e le 06:00 affinché le misurazioni non siano influenzate dalle radiazioni solari.

La ISO 9869-2:2018 [10] consiglia inoltre di selezionare i dati da elaborare corrispondenti al momento in cui la differenza di temperatura dell'aria tra interno ed esterno sia maggiore o uguale a 10°C, se così non fosse si perderebbe di accuratezza nella definizione della trasmittanza termica tramite scanner IR. Ci interessa predisporre la base dati corretta sia per il metodo HFMM che per il metodo con scanner IR (Comfort Eye nel nostro caso) poiché il confronto dovrà poi avvenire tra valori che siano coerenti e quindi appartenenti allo stesso intervallo temporale.

Servendoci della potenzialità del Python, dal "Codice 1" e "Codice 2" del capitolo "Codici implementati in Python" sono state selezionate 17 fasce orarie (una per ogni giorno) per un totale di 73 ore e 45 minuti facendo anche in modo di darci in output valori in cui sia rispettato il vincolo sulla differenza di temperatura dell'aria tra ambiente interno ed esterno.

Si arriva ad un dataframe cosìfatto:

| date | Hfwall | RTD | tair_in | Tair_out | Twall_in | Twall_out | Ts_wall |
|---------------------|--------|------|---------|----------|----------|-----------|-----------|
| 2020-01-01 00:02:00 | 10.4 | 20.9 | 20.8 | 4.42 | 17.8 | 3.49 | 290.65 |
| 2020-01-01 00:06:00 | 10.3 | 20.9 | 20.8 | 4.22 | 17.8 | 3.35 | 291.25 |
| 2020-01-01 00:11:00 | 10.6 | 20.9 | 20.8 | 4.36 | 17.8 | 3.42 | 290.849.. |
| 2020-01-01 00:15:00 | 10.5 | 20.8 | 20.8 | 4.26 | 17.8 | 3.32 | 290.95 |
| 2020-01-01 00:19:00 | 10.5 | 20.8 | 20.8 | 4.32 | 17.8 | 3.35 | 290.75 |
| 2020-01-01 00:24:00 | 10.1 | 20.8 | 20.8 | 4.26 | 17.8 | 3.35 | 290.75 |
| 2020-01-01 00:28:00 | 10.7 | 20.8 | 20.8 | 3.98 | 17.8 | 3.33 | 290.95 |
| 2020-01-01 00:32:00 | 10.5 | 20.8 | 20.8 | 4 | 17.8 | 3.3 | 290.95 |
| 2020-01-01 00:37:00 | 10.2 | 20.8 | 20.8 | 3.93 | 17.8 | 3.33 | 290.95 |
| 2020-01-01 00:41:00 | 10.2 | 20.8 | 20.8 | 4.19 | 17.8 | 3.26 | 290.849.. |
| 2020-01-01 00:45:00 | 10.4 | 20.8 | 20.8 | 3.9 | 17.8 | 3.17 | 290.849.. |
| 2020-01-01 00:50:00 | 9.82 | 20.8 | 20.8 | 3.22 | 17.8 | 3.1 | 290.849.. |

Figura 23-Dataframe sincronizzato

Il dataframe (Figura 23) tiene conto già della sincronizzazione con il Comfort Eye il quale campiona ogni 4 minuti la temperatura superficiale del pixel considerato Ts_wall e ogni minuto la temperatura dell'aria interna tair_in. Tutte le temperature in °C verranno convertite in Kelvin.

Per comprendere se stiamo trattando misure verosimili che diano risultati non fuorvianti, la normativa ISO 9869-1:2014 [9] consiglia di verificare se il valore della conduttanza termica si mantiene costante durante le rilevazioni.

Ricordiamo che la conduttanza termica ha l'espressione definita dalla Eq. 62. Implementandola in Python ("Codice 3") e graficando il risultato troviamo (Figura 24):

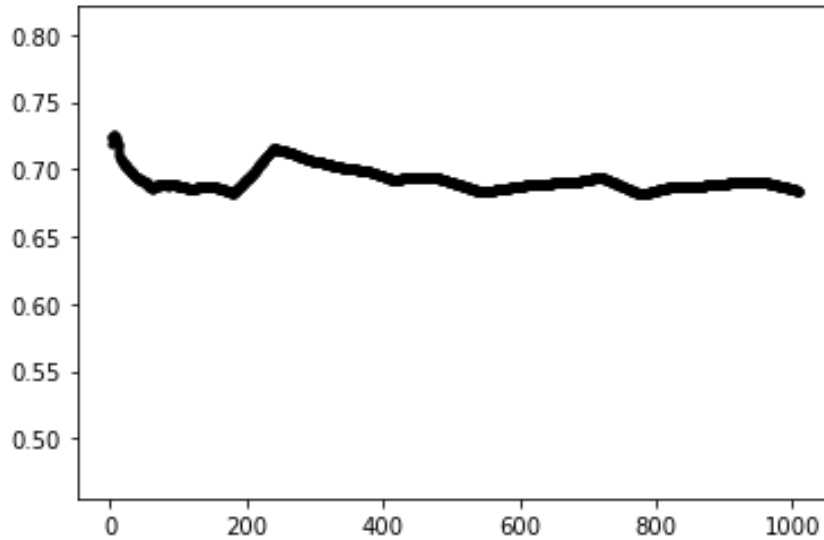


Figura 24-Andamento conduttanza termica

Il quale ha un valore pressochè costante $\Lambda \cong 0,7 \frac{W}{m^2K}$, per cui possiamo avere certezza sulla accuratezza dei dati di partenza.

A questo punto, attraverso l'implementazione del "Codice 4", è possibile determinare la U_{HFM} che è stata ricavata attraverso il metodo della media mobile, dalla Eq. 63.

Per una migliore comprensione è possibile plottarne l'andamento (Figura 25):

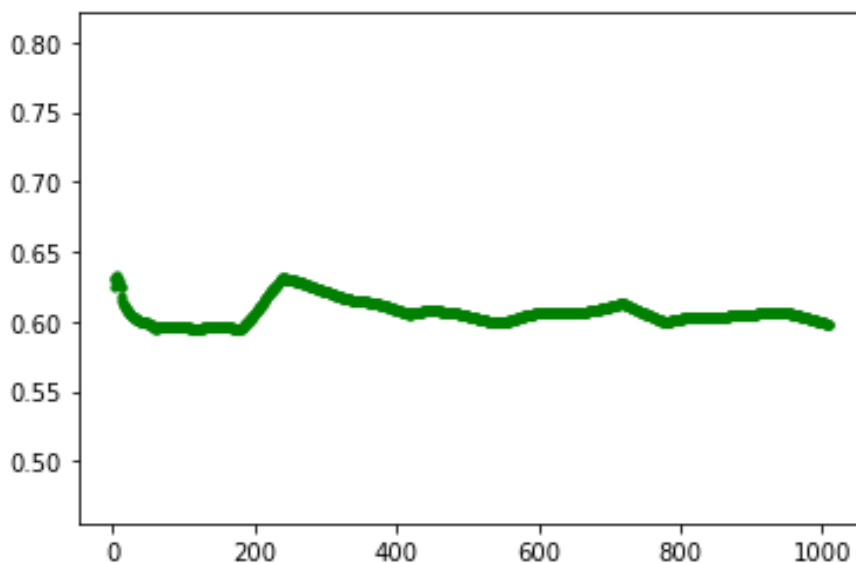


Figura 25-Andamento U_{HFM}

Il valore ultimo della trasmittanza termica mediante HFMM, e che quindi costituirà il riferimento per il confronto con la trasmittanza termica determinata tramite Comfort Eye, è $U_{HFMM} = 0,598 \frac{W}{m^2K}$

8.2.Determinazione di $U_{Comfort\ Eye}$

Nella fase di utilizzo dello strumento multi-sensore IoT andremo a prelevare dal Desk Node la temperatura dell'aria interna t_{air_in} , da stazione meteorologica locale la temperatura dell'aria esterna T_{air_out} e dal Ceiling Node la temperatura superficiale delle pareti interne dell'edificio in esame T_{s_wall} . Mantenendo sempre le stesse condizioni di misura con durata minima di acquisizione di 72 ore e differenza di temperatura dell'aria tra interno ed esterno maggiore di $10^{\circ}C$, dopo aver sincronizzato i vari input possiamo andare a valutare la trasmittanza termica dell'involucro edilizio.

Nella Figura 23, nella colonna T_{s_wall} , sono rappresentati i valori di temperatura superficiale riferiti al pixel della mappa termografica corrispondente al riquadro rosso della Figura 21.

Implementando il "Codice 5" si vanno a trovare i diversi valori di $U_{Comfort\ Eye}$, che plottati si mostrano in questo modo (Figura 26):

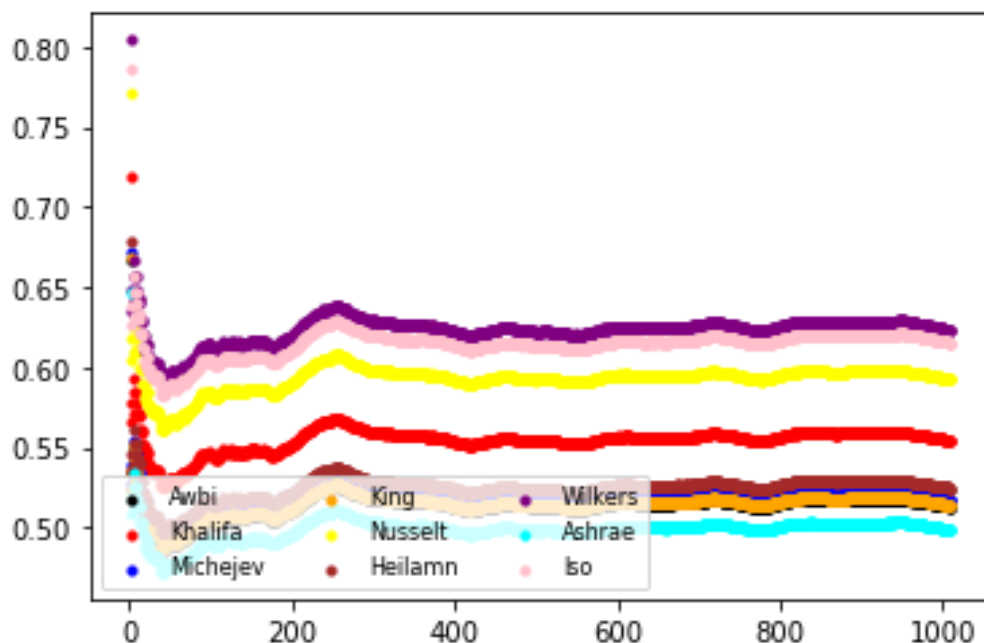


Figura 26-Andamenti dei valori di trasmittanza termica mediante Comfort Eye secondo diversi modelli matematici di h_c

In termini di numeri, i risultati riferiti al valore ultimo sono:

- Awbi: $U_{Comfort Eye} = 0,513 \frac{W}{m^2K}$
- King: $U_{Comfort Eye} = 0,514 \frac{W}{m^2K}$
- Wilkers: $U_{Comfort Eye} = 0,623 \frac{W}{m^2K}$
- Khalifa: $U_{Comfort Eye} = 0,555 \frac{W}{m^2K}$
- Nusselt: $U_{Comfort Eye} = 0,593 \frac{W}{m^2K}$
- Ashrae: $U_{Comfort Eye} = 0,499 \frac{W}{m^2K}$
- Michejev: $U_{Comfort Eye} = 0,517 \frac{W}{m^2K}$
- Heilamn: $U_{Comfort Eye} = 0,525 \frac{W}{m^2K}$
- Iso: $U_{Comfort Eye} = 0,615 \frac{W}{m^2K}$

8.3.Considerazioni finali

A questo punto si va a scegliere il modello di h_c più adatto.

Inserendo in uno stesso grafico tutti i risultati otteniamo (Figura 27)

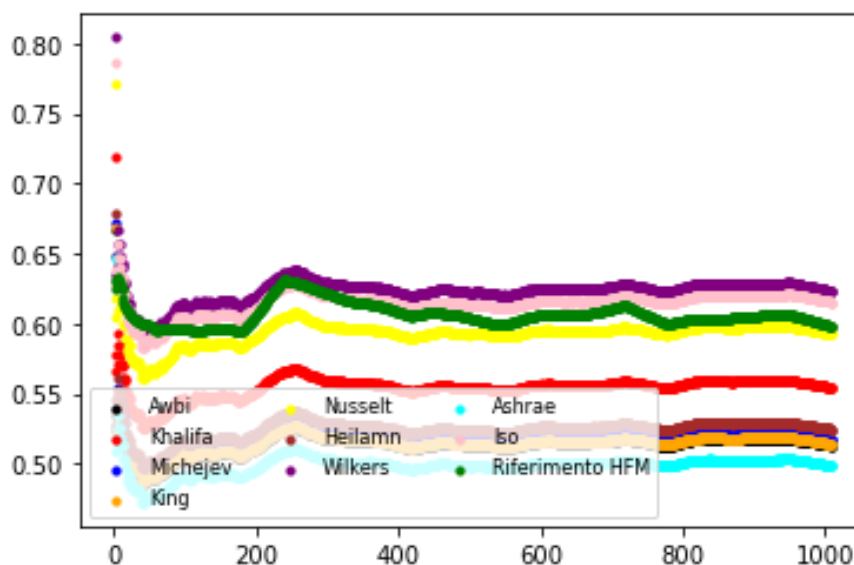


Figura 27-Confronto tra trasmittanza termica termoflussimetro e Comfort Eye

Si nota che i modelli di h_c che forniscono un valore di trasmittanza termica che più si avvicina al riferimento sono: Wilkers, Iso, Khalifa ed il migliore in assoluto è il modello di Nusselt.

Con il modello di Ashrae abbiamo un risultato meno accurato.

Quindi, rispetto al riferimento con termoflussimetro (HFM), abbiamo:

- Con Nusselt una sottostima di 0,92%
- Con Iso una sovrastima di 2,83%
- Con Wilkers una sovrastima di 4,08%
- Con Khalifa una sottostima di 7,3%
- Con Ashrae una sottostima di 16,6%

In conclusione, i primi quattro ci forniscono buoni risultati e come già anticipato la soluzione migliore è offerta dal modello di Nusselt.

Quindi, per la validazione del Comfort Eye in merito alla determinazione della trasmittanza termica, viene scelto appunto il modello di Nusselt da Tabella 8 in riferimento alla Eq. 60:

$$h_c = 2,56(T_{ai} - T_{si})^{0,25}$$

Eq. 64

9. Rilevazione di ponti termici non corretti

Vogliamo ora estendere le funzionalità del Comfort Eye proponendo per esso un'ulteriore funzionalità, ovvero sfruttarlo per rilevare in maniera automatizzata eventuali ponti termici non corretti.

Dal capitolo "Efficienza energetica di un edificio", i ponti termici sono punti di una costruzione che presentano flussi termici più rapidi rispetto alle parti circostanti e che provocano scambi di calore più accentuati [4]. Inoltre, i ponti termici sono definiti corretti quando la trasmittanza termica della parete fittizia non supera per più del 15 % la trasmittanza termica della parete corrente (Eq. 65).

$$U_f \leq 1,15U_c$$

Eq. 65

È proprio da questa disequazione che partono le fondamenta del codice per la rilevazione automatizzata di ponti termici non corretti. L'idea è quella di processare una mappa termografica al fine di ottenere le coordinate dei pixel corrispondenti alla zona indisturbata dal ponte termico e da queste ricavare un valore rappresentativo di trasmittanza termica U_c , che moltiplicata per 1,15 costituirà il valore di riferimento $U_{riferimento}$. Per ultimo si confronteranno tutti i valori di trasmittanza termica di ogni singolo pixel della mappa termografica U_{pixel} con la $U_{riferimento}$ e nel caso in cui $U_{pixel} > U_{riferimento}$ il codice ci darà in output il visualizzatore del ponte termico non corretto.

Esempio applicativo

Vediamo ora un esempio applicativo in cui è stata creata una mappa termografica fittizia di una parete che sia più realistica possibile e la quale contiene un ponte termico, di dimensione 16 x 16 pixel coerentemente alle mappe termografiche acquisite dal Comfort Eye. Sono stati ipotizzati anche i parametri ambientali quali temperatura dell'aria interna indicata con T_{in} , temperatura dell'aria esterna T_{out} ed emissività della parete ε .

I dati sono:

- $T_{in} = 20,8 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{out} = 13 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\varepsilon = 0,96$

E la mappa termografica ipotizzata è la Figura 28:

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|----|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 1 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 2 | 20 | 20 | 16.9 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 3 | 20 | 20 | 16.85 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 4 | 20 | 20 | 16.8 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 5 | 20 | 20 | 16.75 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 6 | 20 | 20 | 16.7 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 7 | 20 | 20 | 16.65 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 8 | 19.8 | 19.8 | 16.6 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 |
| 9 | 19.8 | 19.8 | 16.55 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 |
| 10 | 19.8 | 19.8 | 16.5 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 |
| 11 | 19.7 | 19.7 | 16.45 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 |
| 12 | 19.7 | 19.7 | 16.4 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 |
| 13 | 19.7 | 19.7 | 16.35 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 | 19.7 |
| 14 | 19.6 | 19.6 | 16.3 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 |
| 15 | 19.6 | 19.6 | 16.25 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 | 19.6 |

Figura 28-Mappa termografica

I valori di temperatura superficiale T_{s_wall} qui sopra indicati sono espressi in [°C].

La prima fase consiste nel rendere la mappa termografica (Figura 28), con appunto valori di temperatura, in una mappa binaria (Figura 29). Quello che si fa è un processamento di immagine attraverso il "Codice 6" in cui si trasforma la mappa nel formato uint8 che ha valori compresi tra 0 (nero) e 255 (bianco) e di quest'ultima si calcola il valore medio che costituirà il valore di soglia. Sopra il valore di soglia verrà assegnato il valore 255 e sotto il valore di soglia lo 0, fornendoci quindi una mappa di questo tipo (Figura 29):

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 1 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 2 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 3 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 4 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 5 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 6 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 7 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 8 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 9 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 10 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 11 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 12 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 13 | 255 | 255 | 0 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 29-Mappa binaria per l'individuazione del ponte termico

Le zone identificate con il 255 mi indicano le zone indisturbate dal ponte termico. Con il “Codice 7” siamo in grado di identificare le coordinate dei pixel con valore 255 e con tali coordinate entriamo nella mappa termografica di partenza (Figura 28). A questo punto avremo diversi valori di temperatura superficiale della zona indisturbata e di questi verrà trovato il valore medio, si troverà quindi Ts_mean . Da tale “Codice 7” viene applicato il modello matematico validato nel capitolo precedente “Validazione del Comfort Eye nella determinazione della trasmittanza termica” per la determinazione della trasmittanza termica, ovvero quel modello in cui si ha h_c prelevato da Tabella 8.

$$U_c = \frac{\dot{q}_{cond}}{Tin - Tout} \quad \text{Eq. 66}$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_{cond} &= \dot{q}_{irr} + \dot{q}_{conv} = \\ &= \varepsilon\sigma(Tin^4 - Ts_mean^4) + 2,56(Tin - Ts_mean)^{0,25}(Tin - Ts_mean) \end{aligned} \quad \text{Eq. 67}$$

Utilizzando le Eq. 66 e Eq. 67 si ricava la U_c (Eq. 68), la trasmittanza termica della parete indisturbata che moltiplicata per 1,15 ci darà la $U_{riferimento}$ (Eq. 69):

$$U_c = 0,249 \frac{W}{m^2K} \quad \text{Eq. 68}$$

$$U_{riferimento} = U_c \cdot 1,15 = 0,287 \frac{W}{m^2K} \quad \text{Eq. 69}$$

Nota la $U_{riferimento}$ si andrà a ricavare la trasmittanza termica di ogni pixel U_{pixel} di coordinate i,j della mappa termografica di partenza (Figura 28) con il “Codice 8”, il quale ovviamente anche qui applica lo stesso modello matematico precedente con h_c di Nusselt (Eq. 70).

$$U_{pixel} = U_{i,j} = \frac{\dot{q}_{cond_{i,j}}}{Tin - Tout} \quad \text{Eq. 70}$$

Dove:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{cond_{i,j}} = \\ = \varepsilon\sigma(T_{in}^4 - T_{s_wall_{i,j}}^4) + 2,56(T_{in} - T_{s_wall_{i,j}})^{0,25}(T_{in} - T_{s_wall_{i,j}}) \end{aligned} \quad Eq. 71$$

L'ultima porzione di codice "Codice 9", andrà a confrontare ogni U_{pixel} (Figura 30) della mappa termografica con il riferimento $U_{riferimento}$ (Eq. 69), dandoci in output il visualizzatore del ponte termico non corretto con il colore blu. Si vede nella Figura 30 la mappa con i valori di trasmittanza termica di ogni singolo pixel e nella Figura 31 vi è il visualizzatore:

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 0.249 | 0.249 | 0.288 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 0.249 | 0.249 | 0.308 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 0.249 | 0.249 | 0.328 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 0.249 | 0.249 | 0.349 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 0.249 | 0.249 | 0.37 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 0.249 | 0.249 | 0.391 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 0.328 | 0.328 | 0.412 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 |
| 0.328 | 0.328 | 0.434 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 |
| 0.328 | 0.328 | 0.456 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 | 0.328 |
| 0.37 | 0.37 | 0.478 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 |
| 0.37 | 0.37 | 0.5 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 |
| 0.37 | 0.37 | 0.523 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 |
| 0.412 | 0.412 | 0.545 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 |
| 0.412 | 0.412 | 0.568 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 | 0.412 |

Figura 30-Valori di trasmittanza termica di ogni pixel U_{pixel}

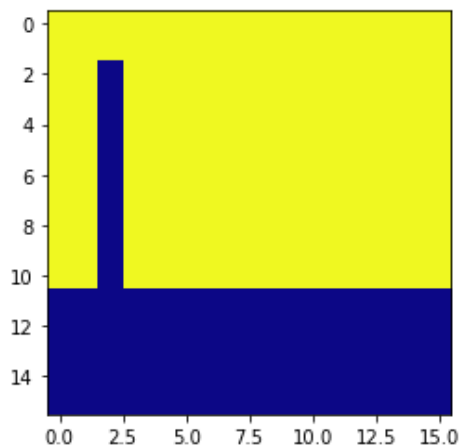


Figura 31-Visualizzatore del ponte termico non corretto

10. Rilevazione di punti a rischio condensa

La rilevazione di eventuali punti a rischio condensa avviene applicando il modello di Magnus-Tetens Eq. 25 il quale mi permette di determinare la temperatura di rugiada.

Anche qui è stata ipotizzata una mappa termografica di dimensione 16 x 16:

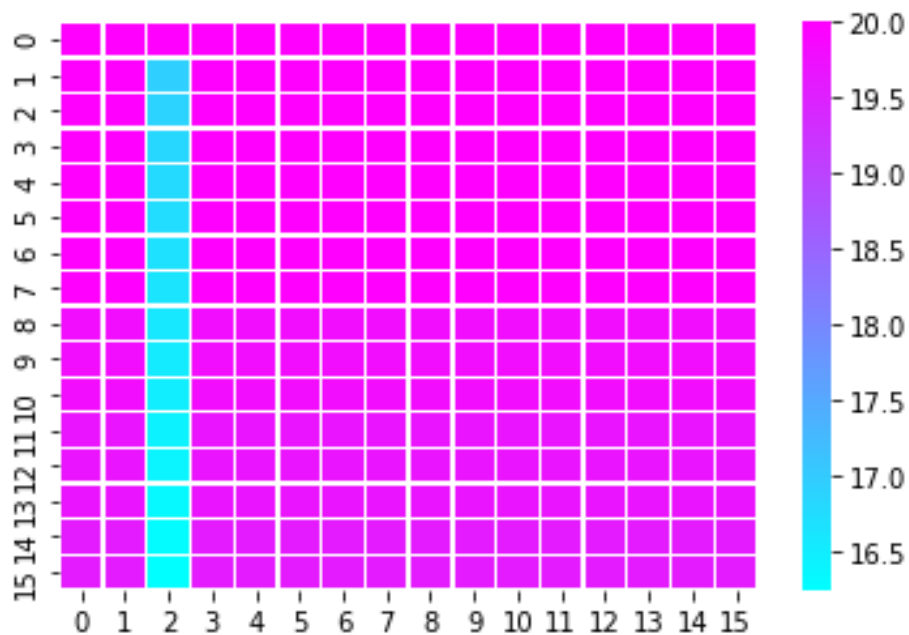


Figura 32-Mappa termografica

Imponendo ad esempio le condizioni:

- $UR = 50\%$
- $T_{air} = 20,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ed utilizzando il "Codice 10", il quale confronta $Ts_{wall_{i,j}}$ di ogni pixel della mappa termografica con la $T_{rugiada}$ calcolata mediante l'Eq. 25, notiamo che il sistema non rileva alcun punto a rischio condensa (Figura 33)

```
temperatura di rugiada = 9.989472382417784  
nessun punto a rischio condensa
```

Figura 33-Output senza punti a rischio condensa

Per il semplice fatto che non c'è nessun pixel della mappa termografica (Figura 32) con valore di temperatura superficiale minore a quello della temperatura di rugiada indicato nella Figura 33.

Inserendo ad esempio un valore di temperatura di 9°C (inferiore alla temperatura di rugiada) come in Figura 34.

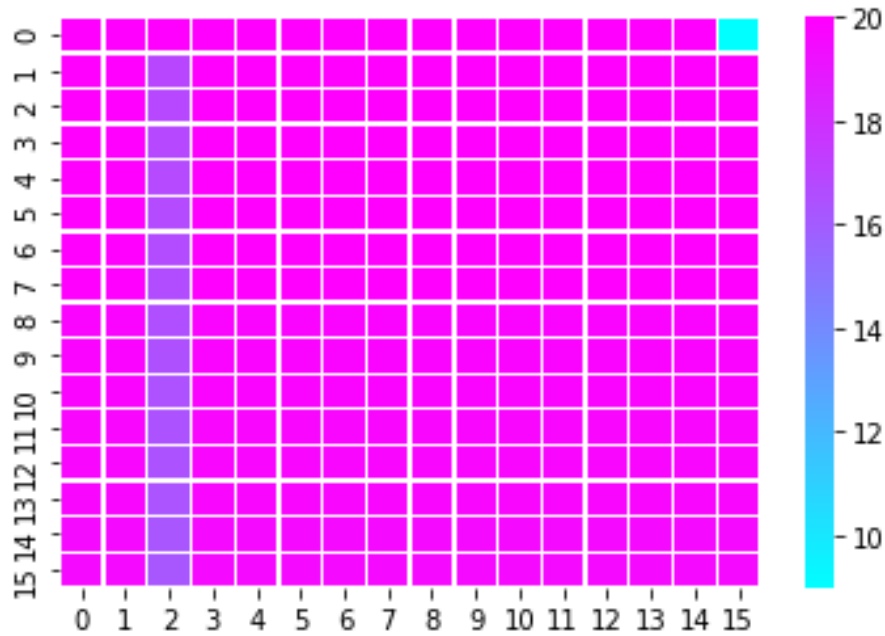


Figura 34-Mappa termografica con pixel a temperatura inferiore alla temperatura di rugiada

Il sistema ci avvertirà del punto a rischio condensa e della sua relativa posizione (Figura 35):

```
temperatura di rugiada = 9.989472382417784  
punto a rischio condensa nella posizione {'altezza': 0, 'larghezza': 15}
```

Figura 35-Output con punto a rischio condensa

11. Conclusioni

Con la conclusione dell'elaborato possiamo ora affermare che il Comfort Eye è un ottimo strumento per la determinazione della trasmittanza termica in sito poiché ci dà un risultato che si discosta solamente dello 0,92% dal valore di riferimento determinato mediante metodo del termoflussimetro.

Il sistema IoT validato ora anche per questo compito potrà essere utilizzato in un qualsiasi ambiente per valutarne, oltre al suo grado di salubrità nei confronti delle persone che lo vivono, il grado di isolamento termico e quindi l'efficienza energetica in tempo reale con buona precisione.

La misura della trasmittanza termica continuativa integrata con la misura del comfort termico ci permette di avere informazioni sul fabbisogno energetico di una abitazione servendoci della possibilità di bilanciare, nella maniera più opportuna, la potenza richiesta per poter mantenere un determinato microclima con la potenza fornita.

Per ampliare le funzionalità del Comfort Eye sono stati proposti degli strumenti utili ad individuare eventuali difetti nelle pareti come ponti termici non corretti e punti a rischio condensa.

Il codice per la rilevazione dei ponti termici non corretti potrebbe avere la criticità di non selezionare in maniera estremamente precisa la zona in cui non è presente il ponte termico portando ad avere un valore di trasmittanza termica di riferimento troppo severo quindi troppo basso oppure può portare ad una sottostima del problema presentando un valore di riferimento troppo alto.

Per studi futuri potrebbe essere interessante ottimizzare il codice per la rilevazione di ponti termici non corretti migliorando la selezione automatica delle coordinate della zona indisturbata dal ponte termico per ottenere un valore ancora più preciso della trasmittanza termica di riferimento.

Inoltre, si potrebbero ulteriormente ampliare le funzionalità del Comfort Eye rendendolo capace di rilevare eventuali guasti alle tubazioni, infiltrazioni di acqua e guasti elettrici.

12. Bibliografia e riferimenti

- [1]-Y. Cengel (2005). Termodinamica e trasmissione del calore. McGraw-Hill.
- [2]-dispense "Fisica Tecnica", Prof. Ing. Fabio Polonara
- [3]-dispense "Metodi e strumenti per la diagnostica", Prof. Ing. Gian Marco Revel
- [4]-dispense "Impianti termotecnici", Prof. Ing. Costanzo Di Perna
- [5]-tesi Stefano Nicolini -"Sviluppo di un sistema e metodo di monitoraggio dell'Indoor Environmental Quality"
- [6]-ISO 6946
- [7]-ISO 7726
- [8]-ISO 7730
- [9]-ISO 9869-1:2014
- [10]-ISO 9869-2: 2018
- [11]-Comparison of Infrared Thermography and Heat Flux Method for Dynamic Thermal Transmittance Determination - Mergim Gaši, Bojan Milovanović and Sanjin Gumbarević
- [12]-<https://www.termografiatop.it/wp-content/uploads/2013/11/tabella-emissivit%C3%A0-materiali-TERMOGRAFIA-TOP.jpg>
- [13]-ISO 8302
- [14]-ISO 8301
- [15]-http://glossariometeo.altervista.org/Punto_di_rugiada.php
- [16]-Appendice B (Allegato 1, Capitolo 4) REQUISITI SPECIFICI PER GLI EDIFICI ESISTENTI SOGGETTI A RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA
- [17]-Allegato A D.Lgs 192
- [18]-<https://www.tdblog.it/gateway-che-cose-come-funziona-e-perche-oggi-e-fondamentale/>
- [19]-Revel G.M., Arnesano M., Pietroni F. "Development and validation of a low-cost infrared measurement system for real time monitoring of indoor thermal comfort". Measurement Science and Technology, vol. 25(085101), 2014L

[20]-UNI EN 27726

[21]-dispense "Impianti di Conversione Energetica", Prof. Ing. Gabriele Comodi

[22]-https://it.wikipedia.org/wiki/Punto_di_rugiada

[23]-<https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/34008131>

[24]-IEC 60584-1

13. Appendice

Trasmissione del calore [1], [2]

La trasmissione di calore è un fenomeno di trasporto di energia di tipo termico. Essa ha luogo quando l'energia interna di un sistema fluisce verso un altro sistema e ciò avviene quando vi è una differenza di temperatura fra i due sistemi. Il fenomeno è spiegato dal primo e dal secondo principio della termodinamica:

- Primo principio della termodinamica: se i due sistemi sono isolati dall'ambiente la diminuzione dell'energia interna dell'uno è pari all'aumento dell'altro.
- Secondo principio della termodinamica: il trasferimento di energia termica avviene spontaneamente dalla temperatura maggiore a quella minore.

La termodinamica però riguarda gli stati di equilibrio della materia e, nonostante che permetta di calcolare la quantità di energia scambiata da un sistema che passa da uno stato di equilibrio ad un altro, non riconosce che lo scambio di calore è un processo di non equilibrio.

Affinché ci sia scambio termico ci deve essere un gradiente di temperatura, ovvero un non-equilibrio termodinamico.

La trasmissione di calore cerca di quantificare la velocità con cui viene scambiato il calore:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \dot{Q}$$

Eq. 72

\dot{Q} prende il nome di potenza termica e la sua unità di misura è $\left[\frac{J}{s} \right]$, altresì detta Watt.

Tale potenza è dipendente dalla natura del mezzo in esame.

Abbiamo 3 differenti meccanismi di scambio termico che sono:

- Scambio termico per conduzione
- Scambio termico per convezione
- Scambio termico per irraggiamento

Scambio termico per conduzione

La conduzione di calore è un fenomeno di propagazione dell'energia per contatto diretto delle particelle di un corpo.

Più in generale si tratta di trasferimento di calore in uno o tra più mezzi a contatto fisico a causa di una non uniforme distribuzione della temperatura nel mezzo o nei mezzi a contatto.

Macroscopicamente si parla di scambi di energia cinetica tra molecole situate in regioni ad alta e bassa temperatura.

Nei gas e nei liquidi gli scambi di energia cinetica sono attribuibili a collisioni elastiche di molecole mentre nei solidi a vibrazioni del reticolo (solidi non conduttori) o al moto degli elettroni liberi (solidi conduttori).

Lo studio della conduzione richiede la conoscenza del campo di temperatura all'interno di un corpo ad esempio.

In particolare, è utile definire il gradiente della temperatura:

$$\vec{\nabla T} = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}$$

Eq. 73

Il luogo dei punti ad uguale temperatura individua quella che è detta superficie isoterma ed il vettore gradiente è un vettore perpendicolare a tali superfici.

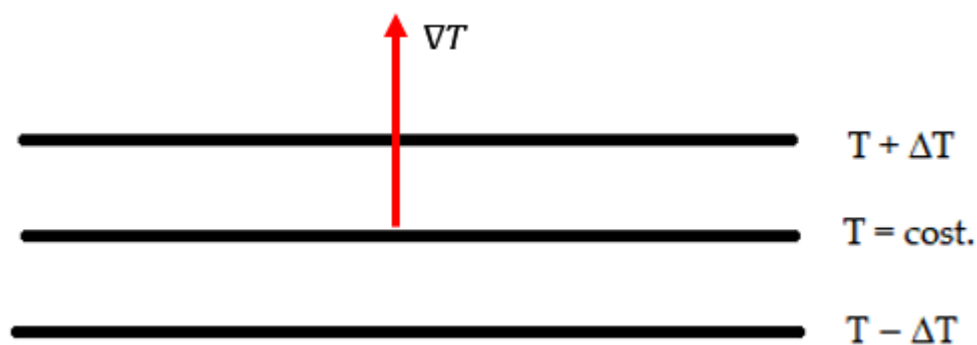


Figura 36-Gradiente termico

La legge generale di Fourier è espressa dalla Eq. 74.

$$\dot{q} = -k\nabla T$$

Eq. 74

Dove \dot{q} è il flusso termico specifico ottenuto dividendo \dot{Q} per l'area di scambio termico A.

Il segno negativo è dovuto al fatto che il flusso termico specifico ha verso opposto al gradiente di temperatura.

La costante k è dimensionale ed è detta conducibilità termica del materiale e la sua unità di misura è $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$.

In un mezzo omogeneo la conducibilità termica è identica in ogni punto del mezzo ed inoltre in un mezzo isotropo la conducibilità termica in un punto è indipendente dalla generica direzione uscente da quel punto.

Nelle più comuni condizioni di lavoro sono consentite le seguenti ipotesi:

- Solido isotropo ed omogeneo: $k = \text{cost.}$
- Regime stazionario: $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$
- Flusso monodimensionale
- Simmetria piana

Poiché la potenza termica accumulata è data da:

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_u = \frac{\partial E}{\partial t}$$

Eq. 75

Indicando con \dot{Q}_e la potenza termica entrante e \dot{Q}_u la potenza termica uscente

Dalle ipotesi precedenti si otterrà:

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_u = 0$$

Eq. 76

Ed è infine possibile esprimere la legge di Fourier come segue dopo aver integrato lungo lo spessore del corpo:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{k \cdot (T_1 - T_2)}{L}$$

Eq. 77

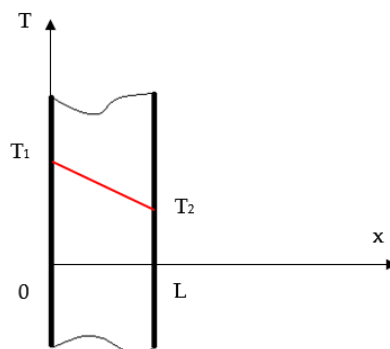


Figura 37-Temperature di superficie interna ed esterna di una parete

Scambio termico per convezione

Nel caso della convezione lo scambio termico complessivo è dovuto alla sovrapposizione di due contributi:

- Trasporto di energia interna a livello molecolare
- Trasporto di energia dovuto al moto della massa di fluido

Se un fluido che avanza sopra una superficie ha una temperatura diversa dalla temperatura della superficie stessa, la differenza di temperatura causerà un flusso termico.

Secondo la legge di Newton:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = h_c \cdot (T_s - T_w)$$

Eq. 78

Dove T_s è la temperatura della superficie, T_w è la temperatura del fluido ed h_c è il coefficiente unitario di scambio termico convettivo.

Il coefficiente unitario di scambio termico convettivo ha come unità di misura $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ ed è dipendente da diverse variabili:

- Proprietà termofisiche del fluido quali viscosità dinamica, conducibilità termica, densità e calore specifico
- Campo di moto
- Geometria della superficie e rugosità superficiale

Poiché il valore di h_c varia da punto a punto lungo la superficie, è bene fare riferimento ad un coefficiente di convezione medio $\overline{h_c}$ mediando i coefficienti di convezione locali su tutta la superficie.

La convezione si suddivide in convezione forzata e convezione naturale.

Nella convezione forzata il moto del fluido è causato da agenti esterni come ad esempio ventilatori, agenti atmosferici, ecc.

Nella convezione naturale il moto è causato soltanto da forze di galleggiamento dovute a gradienti di densità, indotti a loro volta da un campo di temperatura non uniforme.

Ovviamente il valore del coefficiente di convezione cambierà di diversi ordini di grandezza dalla convezione naturale a quella forzata. Generalmente per gli aeriformi si hanno valori di $1 \frac{W}{m^2 \cdot K} < h_c < 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ nel caso della convezione naturale e di $10 \frac{W}{m^2 \cdot K} < h_c < 10^3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ nel caso di convezione forzata.

Scambio termico per irraggiamento

Anche qui ovviamente lo scambio di energia termica radiante avverrà quando si avranno superfici a differente temperatura.

Lo scambio energetico non dipende esclusivamente dalle temperature delle superfici in gioco ma anche dalle loro proprietà radiative, dalla loro geometria e dal loro reciproco orientamento.

Utile alla trattazione è il concetto di cavità: possiamo considerare una superficie come circondata da altre superfici reali o fittizie. Dunque, l'insieme di queste costituisce una cavità. L'utilità risiede nel fatto che è possibile valutare correttamente i contributi di energia termica radiante, da tutte le direzioni dello spazio, sull'area in esame.

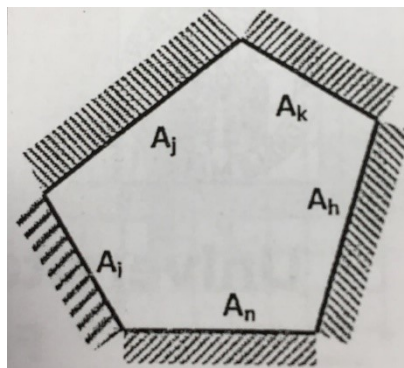


Figura 38-Scambio termico per irraggiamento tra differenti aree

Si danno ora alcuni concetti necessari a sviluppare l'espressione del flusso termico.

Corpo nero: permette di valutare la massima energia termica che può essere emessa per irraggiamento da un corpo, ad ogni temperatura e lunghezza d'onda. Esso è un corpo ideale e costituisce un riferimento per la valutazione della radiazione.

- Assorbe tutta l'energia termica radiante incidente su di esso, quale che sia la distribuzione spettrale e spaziale della radiazione incidente (assorbitore perfetto)
- Ad una data temperatura e lunghezza d'onda nessun corpo può emettere più energia di un corpo nero (radiatore ideale)
- La radiazione emessa da un corpo nero è indipendente dalla direzione (emettitore diffuso)

Il parametro di paragone tra la radiazione emessa da una superficie reale e la radiazione emessa dal corpo nero è chiamato emissività.

L'emissività è appunto il rapporto tra la radiazione emessa da una superficie reale e quella emessa dal corpo nero alla stessa temperatura.

Il corpo grigio è una approssimazione del corpo reale, si sostituisce al valore reale di emissività un valore medio costante indipendente dalla lunghezza d'onda.

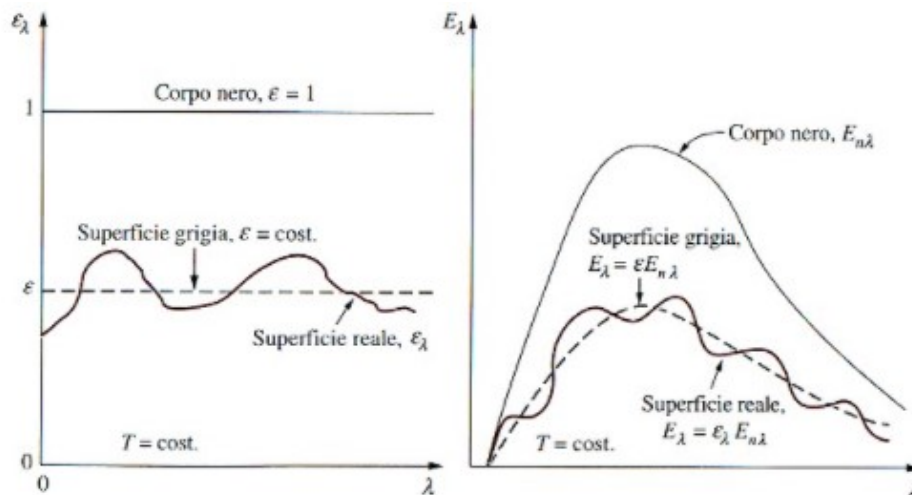


Figura 39-Emissività in funzione della lunghezza d'onda e del tipo di corpo

Indicando con G la radiazione incidente su una superficie per unità di tempo e di area (espressa in $\frac{W}{m^2}$), parte di tale radiazione verrà assorbita, una parte trasmessa ed un'altra riflessa.

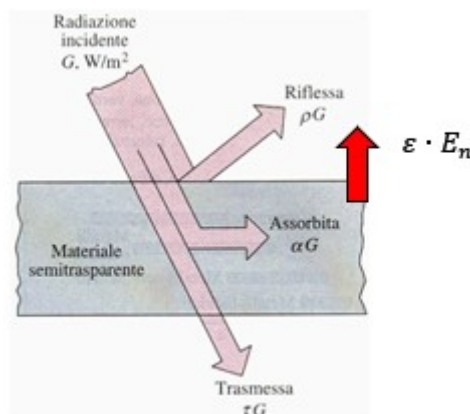


Figura 40-Partizione su di una superficie della radiazione incidente

Parte assorbita: $\alpha = \frac{G_{ass}}{G}$

Parte riflessa: $\rho = \frac{G_{rifl}}{G}$

Parte trasmessa: $\tau = \frac{G_{trasm}}{G}$

I coefficienti appena introdotti hanno valori compresi tra zero e uno.

Vale la seguente relazione:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Eq. 79

Sarà pure presente una componente di emissione diretta dalla superficie pari a $\varepsilon \cdot E_n$, dove ε è l'emissività della superficie ed E_n è il potere emissivo globale del corpo nero espresso in $\frac{W}{m^2}$ (anche ε ha valori compresi tra zero ed uno).

Secondo le seguenti IPOTESI relative alle superfici in esame:

- Superfici isoterme
- Superfici grigie: α e ρ dipendono dalle caratteristiche della superficie e da G. Si adotta inoltre un modello in cui $\alpha = \varepsilon$ (legge di Kirckhoff) con emissività totale valutata alla temperatura della sorgente
- Riflessione ed emissione diffuse (si parla di diffusione quando la rugosità superficiale è maggiore del doppio della lunghezza d'onda)
- Distribuzione uniforme della radiosità (radiosità: somma di emissione diretta e riflessione di una parte dell'irradianza che incide sulla superficie) su ciascuna superficie
- Mezzo all'interno della cavità non partecipante
- Regime stazionario

Ipotesi che mi portano alla espressione del flusso termico radiativo tra due pareti (superficie piccola circondata da una molto più grande):

$$\dot{q} = h_r \cdot (T_1 - T_2)$$

Eq. 80

Dove T_1 è la temperatura della superficie più piccola mentre T_2 della grande.

h_r è il coefficiente unitario di scambio termico radiativo ed è espresso in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$.

14.Codici implementati in Python

```
primointervallo1 = ''2020-01-01 00:02:00''    undici1 =''2020-01-11 00:01:00''
primointervallo2 = ''2020-01-01 04:22:00''    undici2 =''2020-01-11 04:19:00''

secondointervallo1 = ''2020-01-02 00:10:00''    dodici1 =''2020-01-12 00:03:00''
secondointervallo2 = ''2020-01-02 04:26:00''    dodici2 =''2020-01-12 04:23:00''

terzointervallo1 = ''2020-01-03 00:02:00''    tredici1 = ''2020-01-13 00:01:00''
terzointervallo2 = ''2020-01-03 04:22:00''    tredici2 = ''2020-01-13 04:21:00''

quartoint1 = ''2020-01-04 00:09:00''          quattordici1 =''2020-01-14 00:01:00''
quartoint2 = ''2020-01-04 04:24:00''          quattordici2 =''2020-01-14 04:21:00''

quintoint1 = ''2020-01-05 00:03:00''          quindici1 = ''2020-01-15 00:08:00''
quintoint2 = ''2020-01-05 04:22:00''          quindici2 =''2020-01-15 04:28:00''

sestoint1 = ''2020-01-06 00:07:00''          sedici1 =''2020-01-16 00:08:00''
sestoint2 = ''2020-01-06 04:27:00''          sedici2 =''2020-01-16 04:28:00''

settint1 =''2020-01-07 00:10:00''             diciassette1 =''2020-01-17 00:10:00''
settint2 =''2020-01-07 04:30:00''             diciassette2 =''2020-01-17 04:30:00''

ottint1 = ''2020-01-08 00:00:00''             ottint2 =''2020-01-08 04:20:00''

novint1 =''2020-01-09 00:00:00''
novint2 =''2020-01-09 04:19:00''

decint1 =''2020-01-10 00:02:00''
decint2 =''2020-01-10 04:22:00''

sync1 = sync1.loc[primointervallo1:primointervallo2]
sync2 = sync1.loc[secondointervallo1:secondointervallo2]
sync3 = sync1.loc[terzointervallo1:terzointervallo2]
sync4 = sync1.loc[quartoint1:quartoint2]
sync5 = sync1.loc[quintoint1:quintoint2]
sync6 = sync1.loc[sestoint1:sestoint2]
sync7 = sync1.loc[settint1:settint2]
sync8 = sync1.loc[ottint1:ottint2]
sync9 = sync1.loc[novint1:novint2]
sync10 = sync1.loc[decint1:decint2]
sync11 = sync1.loc[undici1 :undici2]
sync12 = sync1.loc[dodici1:dodici2]
sync13 = sync1.loc[tredici1:tredici2]
sync14 = sync1.loc[quattordici1:quattordici2]
sync15 = sync1.loc[quindici1:quindici2]
sync16 = sync1.loc[sedici1:sedici2]
sync17 = sync1.loc[diciassette1:diciassette2]
sync = pd.concat([sync1,sync2,sync3,sync4,sync5, sync6, sync7,
                  sync8,sync9,sync10,sync11,sync12,sync13,sync14,sync15,sync16, sync17], axis=0)
```

Codice 1-Selezione delle fasce orarie

```

sync['AT_wall_trasmittance'] = pd.to_numeric(sync['RTD']) - pd.to_numeric(sync['Tair_out'])
sync = sync[sync.AT_wall_trasmittance >= 10]
AT_wall_trasmittance = sync['AT_wall_trasmittance']

```

Codice 2-Selezione dei dati con la giusta differenza di temperatura dell'aria interna ed esterna

```

conduttanza_termica = []
numeratore = []
denominatore = []
for i in range(len(AT_wall_trasmittance)):
    if i>=0:
        numeratore = (Hfwall[:i].sum())
        denominatore = ((sync['Twall_in'][:i]-sync['Twall_out'][:i]).sum())
        conduttanza_termica.append(numeratore/denominatore)

```

Codice 3-Valutazione della conduttanza termica

```

for i in range(len(AT_wall_trasmittance)):
    if i>=0:
        hft = (Hfwall[:i].sum())
        dt_air = (AT_wall_trasmittance[:i].sum())
        trans.append(hft/dt_air)

```

Codice 4-Valutazione della trasmittanza termica da termoflussimetro

```

for i in range(len(AT_wall_trasmittance)):
    if i>=0:
        hfce1 = (qcond_wall['Hcwall_awbi'][:i].sum())
        hfce2 = (qcond_wall['Hcwall_khalifa'][:i].sum())
        hfce3 = (qcond_wall['Hcwall_michejev'][:i].sum())
        hfce4 = (qcond_wall['Hcwall_king'][:i].sum())
        hfce5 = (qcond_wall['Hcwall_nusselt'][:i].sum())
        hfce6 = (qcond_wall['Hcwall_heilamn'][:i].sum())
        hfce7 = (qcond_wall['Hcwall_wilkens'][:i].sum())
        hfce8 = (qcond_wall['Hcwall_Ashrae'][:i].sum())
        hfce9 = (qcond_wall['Hcwall_iso'][:i].sum())
        dt_air = (AT_wall_trasmittance[:i].sum())
        u_ce1.append(hfce1/dt_air)
        u_ce2.append(hfce2/dt_air)
        u_ce3.append(hfce3/dt_air)
        u_ce4.append(hfce4/dt_air)
        u_ce5.append(hfce5/dt_air)
        u_ce6.append(hfce6/dt_air)
        u_ce7.append(hfce7/dt_air)
        u_ce8.append(hfce8/dt_air)
        u_ce9.append(hfce9/dt_air)

```

Codice 5-Valutazione della trasmittanza termica da Comfort Eye

```

#questo array rappresenta la mappa termografica
imgIR = np.array([[20 , 20 , 20 , 20 , 20 , 20 , 20 , 20 , 20 , 20 , 20 ,
#imgIRplot = plt.imshow( imgIR, cmap = 'plasma')
rangeMin = np.min(imgIR) # low threshold temp in C
rangeMax = np.max(imgIR) # high threshold temp in C

# Apply thresholds based on min and max ranges
depth_scale_factor = 255.0 / (rangeMax-rangeMin)
depth_scale_beta_factor = -rangeMin*255.0/(rangeMax-rangeMin)

depth_uint8 = imgIR*depth_scale_factor+depth_scale_beta_factor
depth_uint8[depth_uint8>255] = 255
depth_uint8[depth_uint8<0] = 0
depth_uint8 = depth_uint8.astype('uint8')

#vado a definire il valore di soglia
valore_medio = np.mean(depth_uint8)
print(valore_medio)

# qui sotto applico la sogliatura
depth_uint8[depth_uint8 >= valore_medio] = 255
depth_uint8[depth_uint8 < valore_medio] = 0

```

Codice 6-Processamento della mappa termografica

```

#cerco tutti i punti con valore di 255
punti_indisturbati = np.where(depth_uint8 == 255)
#definisco le rispettive coordinate
x = punti_indisturbati[0]
y = punti_indisturbati[1]
#estraggo le temperature dalla mappa originale imgIR
#entrando con le coordinate appena ricavate
Temperature_indisturbate = imgIR[x,y]

temp_media = np.mean(Temperature_indisturbate)

AT_wall = Tin-temp_media

hc_wall = 2.56*(AT_wall**0.250) #con Nusselt
hr_wall = (emiss*sigma*(Tin**4-temp_media**4))/AT_wall

qrad_wall = hr_wall*AT_wall
qconv_wall = hc_wall*AT_wall

qcond = qrad_wall + qconv_wall

#differenza di temperatura aria tra interno ed esterno
AT_trasmittance = Tin - Tout

U_parete_indisturbata = qcond / AT_trasmittance
U_riferimento = 1.15*U_parete_indisturbata

```

Codice 7-Valutazione della trasmittanza termica di riferimento

```

for i in range(len(Temperature_parete)):
    AT_wall_corrente[i] = Tin[i] - Temperature_parete[i]
    hc_wall_corr[i]= 2.56*(AT_wall_corrente[i]**0.250) #con Nusselt
    hr_wall_corr[i] = (emiss*sigma*(Tin[i]**4-Temperature_parete[i]**4))/AT_wall_corrente[i]
    qconv_corrente[i] = hc_wall_corr[i]*AT_wall_corrente[i]
    qrad_corrente[i] = hr_wall_corr[i]*AT_wall_corrente[i]
    qcond_corr[i]= qconv_corrente[i] + qrad_corrente[i]
    U[i] = qcond_corr[i]/ AT_trasmittance[i]

```

Codice 8-Valutazione della trasmittanza termica di ogni pixel della mappa termografica


```

punti_ponte_termico_non_corretto = []
punti_no_ponte_termico = []
visualizzatore_ponte_termico_non_corretto = np.zeros((16,16))
for i in range(0,len(U_pixel)):
    for j in range(0, len(U_pixel[i])):
        if (U_pixel[i,j] > U_riferimento):
            punti_ponte_termico_non_corretto.append({'altezza':i,'larghezza':j})
            visualizzatore_ponte_termico_non_corretto[i,j] = 0
        else:
            punti_no_ponte_termico.append({'altezza':i,'larghezza':j})
            visualizzatore_ponte_termico_non_corretto[i,j] = 1

if (len(punti_ponte_termico_non_corretto) == 0):
    print('nessun ponte termico NON corretto')
else:
    for i in range(len(punti_ponte_termico_non_corretto)):
        print('ponte termico NON CORRETTO nella posizione',punti_ponte_termico_non_corretto[i])

visualizzatore_ponte_termico_non_corretto = plt.imshow( visualizzatore_ponte_termico_non_corretto, cmap = 'plasma')

```

Codice 9-Visualizzatore del ponte termico con corretto

```

#L'array qui sotto rappresenta la mappa termografica
A = np.array([[20 , 20, 20 , 20, 20 , 20 , 20, 20, 20, 20, 20 ,20 , 20, 20, 20, 20],[20,
ax = sns.heatmap(A, cmap='cool' ,linewidths=0.3)

UR = 50 #umidità relativa percentuale
T_air = 20.8
a = 17.271
b = 237.7
gamma = math.log(UR/100) + (a*T_air)/(b + T_air)
Td = (b*gamma)/(a-gamma)
print('temperatura di rugiada =',Td)
punti_rischio_condensa = []
punti_no_rischio_condensa = []
for i in range(0,len(A)):
    for j in range(0, len(A[i])):
        if (A[i,j] <= Td):
            punti_rischio_condensa.append({'altezza':i,'larghezza':j})
        else:
            punti_no_rischio_condensa.append({'altezza':i,'larghezza':j})

if (len(punti_rischio_condensa) == 0):
    print('nessun punto a rischio condensa')
else:
    for i in range(len(punti_rischio_condensa)):
        print('punto a rischio condensa nella posizione',punti_rischio_condensa[i])

```

Codice 10-Valutazione dei punti a rischio condensa

15. Riflessioni e ringraziamenti

Si conclude un percorso, un capitolo che ha dato una svolta importante alla mia vita. Mi piace pensarlo come un capitolo di un libro senza fine perché non vi è mai una fine al sapere.

Anni di gioie e dolori, insicurezze e paura di non essere all'altezza di realizzare un sogno così grande. Eppure, noi non ci siamo mai abbandonati, io e il mio sogno.

Sì, spesso ci siamo odiati, spesso abbiamo pensato di non voler più avere nulla a che fare l'un con l'altro ma, alla fine, ci si è sempre ritrovati.

E alla fine sono qui, al termine del mio percorso ad affrontare questa grandiosa sfida con me stesso e che mi sta rendendo completamente grato della scelta presa.

Mi fermo a riflettere e penso: cosa mi ha portato questa esperienza?

Ho acquisito tantissimi concetti tecnici ma sarei davvero troppo riduttivo se mi fermassi a questo.

Certamente mi ha portato ad avere più fiducia nelle mie capacità, a ponderare le emozioni e giudizi di chi non mi conosce nel profondo. È vero, ho un carattere difficile ed una personalità introversa ma chi mi sa leggere tra le righe sa bene che ciò che vede non è altro che una piccola punta di un iceberg.

Ho imparato che a volte è necessario accettare le ingiustizie della vita e che in un mondo non sempre giusto bisogna sempre setacciare quei piccoli granelli di positività.

Che da un minuscolo spiraglio di luce possiamo trovare il sole finché c'è speranza che arde.

Che in un mondo sempre in corsa è giusto trovare il proprio passo perché niente e nessuno può permettersi di essere direttore della nostra vita.

Vorrei porgere un ringraziamento speciale ai miei genitori per i tanti sacrifici fatti solo per vedermi felice nonostante le difficoltà, a mia sorella premurosa come una seconda madre e a mio fratello che nonostante i tantissimi chilometri di distanza che ci separano si interessa a me ogni giorno. Sono tanto orgoglioso della mia famiglia.

Un grandissimo grazie alla mia ragazza che è sempre al mio fianco sia nei momenti belli ma soprattutto in quelli più grigi, che non ha mai smesso di credere in me anche quando di fiducia in me non ne avevo più nemmeno io. Un grande abbraccio anche alla sua famiglia che mi mostra continuamente vicinanza e affetto.

Un pensiero a chi non c'è più e che ha contribuito a farmi diventare ciò che sono ora e che mi ha fatto percepire un velo di calore per ripararmi dal freddo dei giorni più difficili.

Un grande abbraccio a tutti i miei veri amici sempre presenti e pronti a darmi quei momenti di spensieratezza e sollievo che solo loro sanno darmi.

Vorrei ringraziare inoltre, per l'opportunità offertami e per il grande supporto dato, al mio relatore e alla mia correlatrice e agli importanti insegnamenti ricevuti dai docenti.

Indipendentemente dal risultato ne uscirò per certo una persona migliore, che si è trovata di fronte a tante difficoltà ma che alla fine non ha mai smesso di lottare per ciò che desidera davvero.

Senza dubbio, non smetterò mai di ricercare la versione migliore di me stesso.