



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**Corso di laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
specializzazione Energia**

**Sviluppo ed applicazione di tecniche basate su misure di comfort per
la gestione energetica degli edifici**

**Development and application of comfort-based techniques for
building energy management**

Relatore:

Prof. Gian Marco Revel

Correlatori:

Prof.ssa Sara Casaccia

Dott.ssa Serena Serroni

Tesi di laurea di:

Richard Kaculi

A.A. 2023/2024

ABSTRACT

Negli ultimi decenni si sta passando sempre più tempo all'interno degli edifici, che siano essi uffici, case o centri commerciali. A questo proposito si sta sempre di più dando un peso maggiore ai parametri che hanno un ruolo fondamentale nella definizione della qualità dell'ambiente interno.

Questa tesi affronta in modo diretto lo studio del comfort di due casi reali, in cui nel primo caso si sono calcolati i vari indici prestazionali (KPI) di comfort ed energetici. Mentre nel secondo caso si è voluto definire un indice globale (IGCI), in cui tener conto dei parametri di comfort disponibili, ricorrendo all'uso dei KPIs calcolati come nella prima parte. Questo parametro potrebbe essere utile ai progettisti per comprendere in modo diretto in che condizioni grava l'edificio/stanza analizzato/a.

Successivamente è stata calcolata l'incertezza associata al modello adoperato per il calcolo dell'IGCI, mediante simulazione Monte Carlo, per comprendere come il sistema di misure adoperato impattasse sull'incertezza del parametro globale. Il modello adoperato si dimostra essere accurato, con un'incertezza di $\pm 4,7\%$, indice della sola propagazione delle incertezze dei singoli sensori adoperati definendo così un sistema di misurazione robusto.

Infine, è stata realizzata anche un'analisi di sensibilità per comprendere al meglio come i parametri misurati impattino sull'indice globale e il loro peso.

Sommario

Capitolo 1 – Introduzione.....	1
Capitolo 2 – Principi teorici.....	3
2.1 – Cosa s’intende per comfort?	3
2.2 – Definizione dei KPIs.....	3
2.2.1 – KPIs Indoor Environmental Quality.....	4
Comfort termico.....	4
Qualità dell’aria.....	5
Comfort acustico	6
2.2.2 – KPIs energetici	7
Consumi energetici totali.....	7
Richiesta di energia primaria	7
Energia risparmiata	7
2.2.3 – KPI economico	8
2.2.4 – KPI ambientale	8
Global warming potential.....	8
2.3 – Indoor global comfort index.....	8
Capitolo 3 – Casi studio e metodi.....	9
3.1 Calcolo dei KPI’s	9
Comfort termico.....	9
Indoor air quality (IAQ) CO ₂ , PM10 e PM2,5.....	12
KPI Energetici	14
Richiesta di energia primaria (KPI.PED)	14
Energia risparmiata (KPI.TES).....	16
KPI Economico (KPI.ACOSE)	16
KPI ambientale (KPI.GWP)	17
3.1.1 – Pilot FVH	18
3.2 Calcolo dell’Indoor Global Comfort Index.....	21
3.3 Metodo per la Ripartizione dei Pesi	22
3.4 Metodo Monte Carlo	23
3.5 Analisi di sensibilità.....	28
3.5.1 – Pilot IEECP	30
Capitolo 4 – Risultati e discussione	32

Pilot 1 – FVH	32
4.1.1 Comfort termico	32
4.1.2 Qualità dell’aria (IAQ)	33
4.1.3 KPI energetici	36
4.1.4 KPI economici	37
4.1.5 KPI di sostenibilità	37
4.2 Pilot 2 – IEECP	38
4.2.1 IGCI	38
4.2.2 Analisi di sensibilità	43
Capitolo 5 – Conclusioni	44
Bibliografia	46

Capitolo 1 – Introduzione

Il settore edilizio ha visto un crescente coinvolgimento degli stakeholders in sistemi capaci di acquisire, immagazzinare e analizzare dati sugli edifici tramite l'Internet delle Cose (IoT). L'alta flessibilità dei nuovi sistemi integrati permette la loro applicazione in campi come la gestione della qualità dell'ambiente interno (IEQ) e il risparmio energetico. È noto che le persone trascorrono molte ore al chiuso [1]. Tipicamente le persone trascorrono fino all'87% del loro tempo al chiuso, sia in edifici residenziali che commerciali, e un ulteriore 6% nei loro veicoli, sono quindi continuamente esposte all'ambiente interno. Pertanto, è di grande importanza comprendere appieno i fattori che influenzano la qualità dell'ambiente interno (IEQ), l'impatto sulla salute e sulla produttività delle persone [2].

Il comfort in questi tipi di ambienti sta diventando sempre più importante, poiché esistono prove diffuse del suo impatto sulla salute, benessere e produttività. È ampiamente accettato che il comfort di un utente, o la qualità dell'ambiente interno (IEQ), consista in quattro parametri principali: comfort termico, la qualità dell'aria interna (IAQ), il comfort acustico e il comfort visivo. Raggiungere alti livelli di IEQ potrebbe prevenire l'insorgere della sindrome dell'edificio malato (SBS), o malattie correlate agli edifici.

Su questa base, la seguente tesi affronta in modo diretto lo studio del comfort di due casi specifici in cui è stato realizzato un efficientamento energetico.

I casi in questione sono: il pilot Forum Virium Helsinki (FVH) situato in Finlandia e il pilot Institute for European Energy and Climate Policy (IEECP) situato nei Paesi Bassi; facenti parte di un progetto europeo più ampio chiamato DigiBUILD [3] che comprende 9 pilot dislocati in tutta Europa come riportato in figura 1. La visione complessiva di DigiBUILD è quella di fornire uno strumento interoperabile e basato sul cloud per trasformare gli edifici attualmente isolati in edifici digitali, e più intelligenti, basati su dati coerenti e affidabili. Questo strumento supporterà processi decisionali per il "monitoraggio e la valutazione delle prestazioni", la "pianificazione delle infrastrutture edilizie", la "formulazione di politiche" e la "riduzione dei rischi negli investimenti" [3].

Nel dettaglio FVH è una società che gestisce oltre 60 edifici esistenti come: uffici, scuole, centri sportivi, ricreativi e centri di assistenza medica al fine di efficientarle sotto tutti gli aspetti energetici e non solo. Nel seguente progetto europeo, l'obiettivo principale di FVH è valutare e implementare metodi moderni di integrazione dei dati, tenendo in considerazione la sicurezza dei dati, l'interoperabilità semantica e la natura dinamica dei sistemi di automazione degli edifici. Tutto ciò per avere dati che forniscano informazioni sul comportamento degli occupanti, sui profili di utilizzo e sulla percezione del comfort da parte degli utenti [3].

IEECP è una società che ha come obiettivo l'espansione dell'applicazione del concetto Pay-for-Performance (P4P) al comfort, attraverso la misurazione della temperatura e della qualità dell'aria interna tramite sensori. Nello specifico, il pilot intende utilizzare dati raccolti dai gestori/proprietari degli edifici partecipanti, con lo scopo di migliorare il comfort nelle scuole di proprietà governativa [3].

La seguente tesi è divisa in due parti la prima in cui si analizzano i dati provenienti dal pilot FVH per ottenere vari indici prestazionali. La seconda parte, invece, prelevando i dati da IEECP, si è passati a calcolare un indice globale che tenesse conto di alcuni fattori caratteristici del comfort, cercando poi di definire attraverso un'analisi di sensibilità mediante simulazione con metodo Monte Carlo, quanto impatti il sistema di misurazione sull'incertezza del parametro globale.

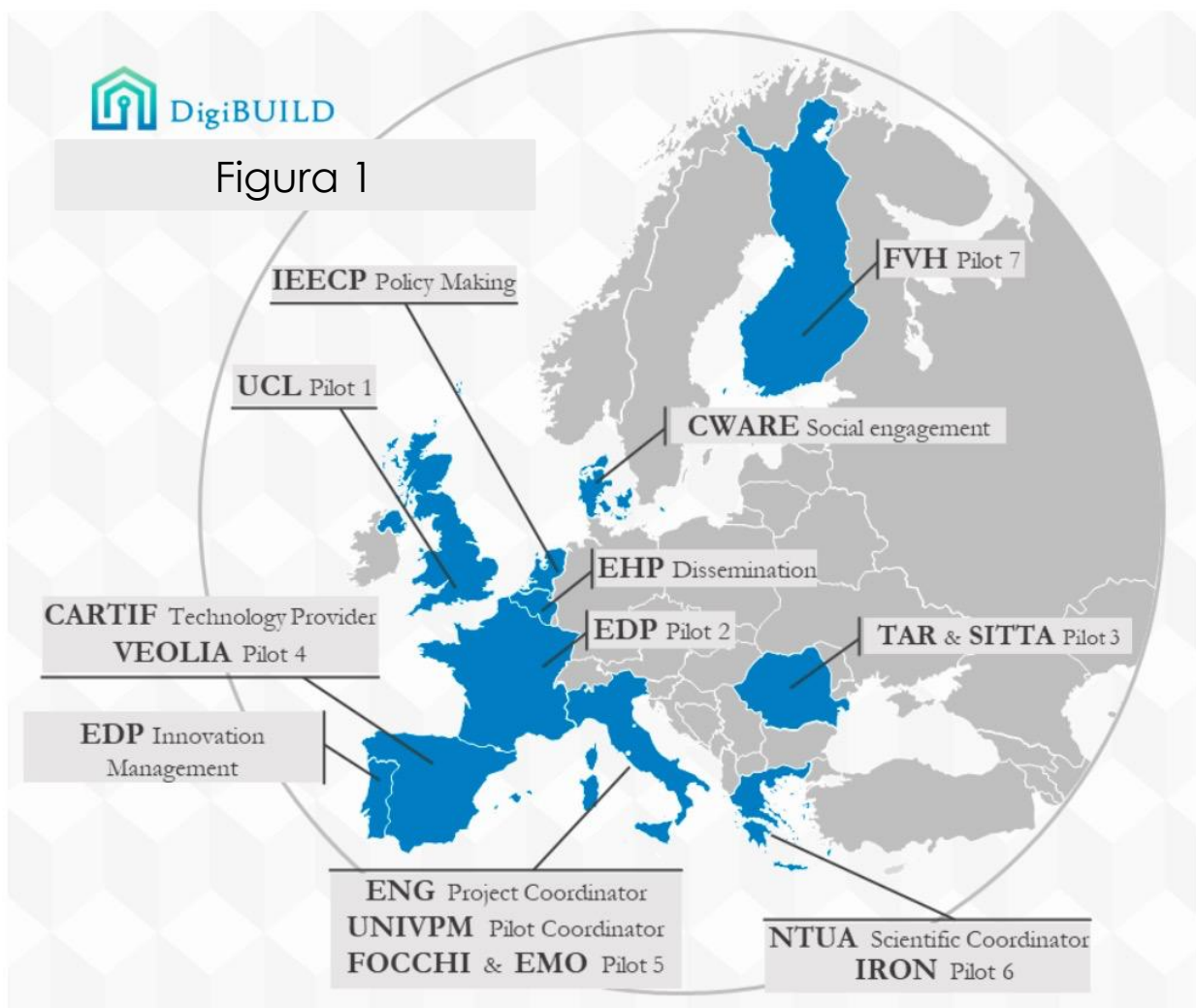


Figura 1: mappa dei pilot, partner e stakeholders del progetto DigiBUILD [3].

Capitolo 2 – Principi teorici

In questo capitolo saranno riportati i principi teorici alla base di questa tesi cercando di spiegare i vari concetti cardine delle assunzioni realizzate.

2.1 – Cosa s'intende per comfort?

Il comfort è un concetto al quanto complesso, ma è basato sulla percezione sensoriale degli occupanti dell'ambiente interno in cui si trovano [4]. Ciò è un aspetto particolarmente importante sin da quando è stato dimostrato che impatta sullo stato di salute fisica e mentale degli occupanti.

Negli ultimi anni si attribuisce sempre maggiore attenzione all'impatto della qualità dell'ambiente interno sulla salute (sick building sindrome), prestazioni e comfort a causa di un incremento di problematiche socio-economiche e sostenibilità degli edifici.

Il comfort, quindi, è definito come una specifica condizione di benessere psico-fisico delle persone. In accordo con la percezione sensoriale dell'individuo in un ambiente [5], [6]. Ciò è influenzato ad esempio dalla temperatura, umidità dell'aria, rumorosità e luminosità dell'ambiente in cui si trovano. Questa distinzione sottolinea una serie di comfort possibili: dal comfort termico a quello acustico.

Successivamente verranno spiegati nel dettaglio le tipologie di comfort trattate nella seguente tesi.

2.2 – Definizione dei KPIs

Un Key Performance Indicator (KPI), è definito come una metrica per ottenere una misurazione su una scala, e come strumento di supporto ai progettisti per avere un rapido feedback sulle performance dell'edificio e permettere così di definire piani di efficientamento/ottimizzazione mirati.

I KPIs presi in considerazione in questa tesi sono i seguenti:

- Indoor environmental quality (IEQ) KPIs: quei KPIs sono legati ai bisogni degli occupanti di un edificio ovvero comfort termico, qualità dell'aria interna, comfort acustico e comfort visivo;
- KPIs energetici: indici che riguardano la misurazione delle prestazioni energetiche come consumo energetico, quantità di energia primaria richiesta ed energia risparmiata;

- KPIs economici: indici che sono legati alla quantità di denaro consumato per garantire l'energia richiesta, la quantità di denaro risparmiato post efficientamento;
- KPI di sostenibilità: indice che definisce l'impatto ambientale dell'edificio permettendo di comprendere se l'edificio è sostenibile o meno.

2.2.1 – KPIs Indoor Environmental Quality

Come riportato precedentemente gli indoor environmental quality (IEQ) KPIs sono legati ai bisogni degli occupanti di un edificio. Nel seguente paragrafo sono riportati le categorie di comfort IEQ prese in esame in questa tesi.

Comfort termico

La normativa UNI 7730 [\[7\]](#) definisce il comfort termico come “la condizione mentale di soddisfazione termica nei confronti del microclima (della stanza), definito come il complesso dei parametri climatici degli ambienti confinati in grado di influenzare gli scambi termici soggetto-ambiente”.

I meccanismi alla base del concetto di comfort termico sono i seguenti:

- Termoregolazione;
- Tempo di acclimatizzazione.

Il primo è un meccanismo fisiologico di controllo a cui spetta il compito di garantire l'equilibrio termico corporeo. In caso di squilibrio, esso interviene attraverso una serie di azioni fisiologiche. Mentre il secondo non fa altro che intervenire sul metabolismo, sui processi interni del corpo e anche sulla sudorazione per permettere all'individuo di adattarsi alle condizioni interne di una stanza. Tipicamente da caldo a freddo il tempo di acclimatizzazione è breve per via di un aumento del tasso calorico dovuto ad un cambiamento del metabolismo basale. Mentre da freddo a caldo il tempo è molto lungo in quanto l'apporto di sangue verso i tessuti epiteliali può aumentare fino al 20%, incremento della sudorazione e i processi interni di adattamento sono lenti.

A tal proposito per determinare in modo significativo la percezione termica dell'occupante della stanza è stato adoperato il Predicted Mean Vote (PMV),

un indice che definisce il comfort termico [7]. Questo parametro può variare in una scala a 7 punti che va da -3 (molto freddo) a +3 (molto caldo). Per PMV nullo si ha la sensazione di comfort.

Pertanto, il KPI di comfort termico è definito come funzione della percentuale di ore fuori dal range del PMV definito [5].

Qualità dell'aria

La qualità dell'aria indoor, indoor air quality (IAQ), rappresenta uno degli aspetti più importanti per il monitoraggio ambientale a causa dell'impatto che ha sulla salute e benessere degli occupanti [8], [9], [10]. La misura delle concentrazioni di inquinanti nell'aria è indicatore di:

- Salubrità dell'ambiente vissuto;
- Efficienza del sistema di ventilazione dell'edificio;
- Delle emissioni di inquinanti dovute alle sorgenti interne;
- Occupazione degli edifici (relativo a profili di CO₂).

Il consumo di energia degli edifici non può prescindere dal mantenimento delle condizioni ottimali di benessere per non incorrere nel rischio di SBS (Sick Building Syndrome). Perciò il monitoraggio della IAQ è uno strumento utile per verificare la necessità di intervenire o per verificare che la riduzione di consumo energetico non sia avvenuta a discapito del benessere.

La valutazione del livello di IAQ [8], [9] si basa solitamente sulla misura di:

- CO₂: principalmente emessa dagli occupanti. Il livello esterno di CO₂ è nell'ordine di 350-500ppm. La presenza di persone in ambienti confinati causa un aumento di CO₂. Un valore accettabile di CO₂ è di 600ppm, per valori superiori si possono avere disturbi (ridotta attenzione, sensazione di stanchezza ecc.) e al di sopra di 1200ppm si incorre in rischi per la salute.
- VOC (componenti volatili organici): particelle organiche emesse da sorgenti interne (vernici, colle, materiali da costruzione ecc.), possono avere una composizione molto complessa necessitando sensori selettivi. Perciò si ricorre alla misura dei componenti totali (TVOC) per ridurre

l'incertezza dovuta alla selettività ed accettando una minor capacità di rilevazione della sorgente specifica.

- PM (particolato): particelle sospese in aria di dimensioni differenti. Le sorgenti possono essere sia interne che esterne (inquinamento atmosferico). I più importanti sono i PM10 e PM2.5 (particelle con diametro maggiore di 10 e 2.5 micrometri).

La scelta delle grandezze da misurare dipende dai casi di applicazione. I sensori di CO₂ sono i più diffusi in quanto la CO₂ è indicato come uno dei principali indicatori di qualità dell'aria in ambito normativo, ma non è una particella dannosa per l'uomo.

Per KPI di qualità dell'aria, nella seguente tesi, è inteso come funzione della percentuale di ore al di fuori del range di categoria di comfort scelta per la stanza designata [8], [9].

Comfort acustico

Il comfort acustico è assegnato al livello dell'edificio intero, attraverso un numero, che fornisce una misura del comfort acustico interno a causa della rumorosità proveniente dall'esterno [11].

In particolare, il comfort acustico è basato sulla valutazione del livello di rumorosità interno per ogni stanza. Questi livelli risultano dalla quantità di rumorosità esterna che riesce a penetrare nell'ambiente interno.

Quindi, il KPI di comfort acustico (KPI.NOISE) è definito come funzione della percentuale di ore al di fuori del range di comfort scelto per una stanza designata [11].

2.2.2 – KPIs energetici

In questo paragrafo, verranno spiegati i KPIs energetici adoperati.

Consumi energetici totali

L'obiettivo di questo kpi è avere una valutazione del consumo energetico dell'edificio, total energy consumption (KPI.TEC) [\[12\]](#), [\[13\]](#). Tipicamente i consumi energetici sono legati al riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria e illuminazione.

Nella seguente tesi i KPI energetici adoperati per definire i consumi sono:

- Consumo energetico per riscaldamento;
- Consumo energetico per raffrescamento;
- Consumo elettrico.

Il consumo energetico per il riscaldamento è definito come “la quantità di energia richiesta per incontrare la domanda di riscaldamento dell'edificio” nel periodo preso in esame. Solitamente il riscaldamento è il vettore energetico che pesa per il 50% sull'energia totale richiesta dall'edificio [\[14\]](#).

Il consumo energetico per il raffrescamento è definito come “la quantità di energia richiesta per incontrare la domanda di raffrescamento dell'edificio” nel periodo preso in esame [\[14\]](#).

Il consumo elettrico di un edificio rappresenta “la quantità di energia richiesta per garantire la domanda di energia elettrica dell'edificio” nel periodo preso in esame.

Richiesta di energia primaria

Questo kpi definisce la quantità di energia primaria, primary energy demand (PED), necessaria da acquistare per garantire l'energia richiesta dall'edificio, tenendo conto di tutto ciò che concerne la produzione dei vari vettori energetici, comprese le perdite dalla filiera produttiva fino all'edificio finale [\[12\]](#), [\[13\]](#).

Energia risparmiata

Questo kpi rappresenta la quantità di energia risparmiata, total energy saving (TES), a seguito dell'efficientamento energetico ottenuto. Ed è un parametro

fondamentale per determinare il quantitativo di denaro risparmiato, dopo l'intervento di efficientamento energetico [15].

2.2.3 – KPI economico

Il kpi economico scelto è il costo annuale per energia risparmiata, annual cost for saved energy (ACOSE), scelto per quantificare in denaro quanto è stato risparmiato grazie all'efficientamento energetico. Dipende dalla quantità di energia risparmiata e dal costo dell'energia [10], [16].

2.2.4 – KPI ambientale

Global warming potential

Il kpi di global warming potential (GWP) è stato scelto per permettere di definire direttamente la quantità di CO₂ non emessa, grazie all'efficientamento energetico realizzato [16], [17].

2.3 – Indoor global comfort index

Poiché le persone trascorrono molto tempo al chiuso, il comfort ambientale è cruciale per salute, benessere e produttività. L'IEQ si basa su quattro fattori principali: comfort termico, qualità dell'aria interna (IAQ), comfort acustico e visivo. Tuttavia, valutare l'impatto di ciascun fattore è complesso, poiché i pesi dei fattori dipendono dalle aspettative degli occupanti, dal tipo di edificio e da variabili esterne come il clima e la stagione. Il comfort globale può essere misurato con un indice (IGCI), che tiene conto di pesi specifici per ogni categoria, calcolati attraverso sensori o sondaggi forniti agli occupanti. Tipicamente una formula generalizzata per l'indoor global comfort index (IGCI) [1] è la seguente:

$$IGCI = c + W_1I_1 + W_2I_2 + \dots + W_nI_n \quad (2.1)$$

Dove:

- c è l'intercetta;
- I sono le diverse categorie di comfort prese in esame;
- W sono i pesi associati ad ogni categoria.

I pesi possono essere assegnati o mediante un'analisi con i sensori o tramite un sondaggio fornito agli occupanti della stanza per comprendere meglio a quale delle categorie prese in esame dare più importanza.

Capitolo 3 – Casi studio e metodi

In questo capitolo vengono riportate tutte le metodologie adoperate per analizzare i due pilot presi in esame.

Il seguente capitolo è diviso a sua volta in due parti di cui la prima affronta tutto ciò che è stato elaborato per il pilot FVH, ovvero il metodo adoperato per il calcolo dei KPIs. Mentre la seconda parte si concentra sul pilot IEECP, partendo dal modello di IGCI adoperato, il metodo adoperato per stimare la sua incertezza e la procedura per l'analisi di sensibilità realizzata.

3.1 Calcolo dei KPI's

Comfort termico

Il *Predicted Mean Vote* (PMV) [7], [18] rappresenta il voto che un gruppo di persone darebbe su una scala di comfort termico, compresa tra -3 (freddo) e +3 (caldo). Lo scopo del PMV è determinare quanto un ambiente sia confortevole dal punto di vista termico e se risponda alle necessità di chi vi soggiorna. La scala è la seguente:

- +3 = Molto caldo
- +2 = Caldo
- +1 = Leggermente caldo
- 0 = Neutro (comfort ottimale)
- -1 = Leggermente freddo
- -2 = Freddo
- -3 = Molto freddo

Il valore di PMV è collegato anche al *Percentage of People Dissatisfied* (PPD), indice che misura la percentuale di persone che non si sentono a proprio agio in un determinato ambiente. Il PPD aumenta man mano che ci si allontana dal valore ottimale del PMV (che è 0).

Il PMV dipende da sei variabili principali, suddivise in due categorie: *ambientali* e *personali*.

$$PMV = f(t_a, t_r, v_a, RH, I_{cl}, M)$$

Variabili Ambientali

Queste variabili descrivono le condizioni fisiche dell'ambiente e sono le seguenti:

1. **Temperatura dell'aria (t_a):** La temperatura dell'aria circostante influenza direttamente la sensazione di caldo o freddo. Se l'aria è troppo calda o troppo fredda rispetto alle condizioni ideali, il valore del PMV si discosterà dallo zero.
2. **Temperatura media radiante (t_r):** Questa variabile rappresenta la media delle temperature superficiali degli oggetti che circondano una persona, come pareti, soffitti, pavimenti e oggetti.
3. **Velocità dell'aria (v_a):** Il movimento dell'aria (ad esempio tramite ventilazione) può migliorare o peggiorare il comfort termico. Un flusso d'aria moderato aiuta a dissipare il calore corporeo, ma velocità troppo elevate possono causare disagio.
4. **Umidità relativa (RH):** L'umidità relativa è la quantità di vapore acqueo presente nell'aria. Alti livelli di umidità riducono la capacità del corpo di dissipare calore tramite la sudorazione, aumentando la percezione del caldo. Umidità troppo bassa può portare a secchezza della pelle e delle mucose, contribuendo alla sensazione di freddo.

Variabili Personali

Queste variabili descrivono le condizioni fisiologiche e comportamentali degli individui:

1. **Attività metabolica (M):** Il tasso metabolico misura il calore prodotto dal corpo umano attraverso il metabolismo. Viene misurato in *met* (1 met = 58,2 W/m², che corrisponde a una persona seduta in riposo). Più è alta l'attività fisica, maggiore sarà il calore prodotto dal corpo, il che può influire sul comfort termico.
2. **Resistenza termica dell'abbigliamento (I_{cl}):** La resistenza termica dei vestiti è misurata in *clo* (1 clo = resistenza di un abbigliamento standard che offre isolamento a 21°C in un ambiente statico). Abiti più pesanti forniscono maggiore isolamento termico, riducendo la dispersione di calore corporeo. In condizioni calde, indumenti leggeri e traspiranti favoriscono il comfort, mentre in ambienti freddi sono preferibili capi più isolanti.

Quindi per calcolare il PMV sono necessari tutti i parametri precedentemente descritti.

In questa tesi i dati necessari al calcolo del PMV non erano disponibili pertanto si è proceduto al calcolo di un PMV semplificato, che nella seguente tesi verrà chiamato sPMV, proprio per differenziarlo dal PMV come descritto da normativa. Ma tutti i successivi approcci come il calcolo del KPI di comfort termico verrà fatto in accordo con la procedura spiegata come da normativa.

Per ogni stanza in cui è disponibile la temperatura (T) e l'umidità relativa (RH), si è calcolato l'sPMV mediante la seguente formula semplificata [19]:

$$sPMV(T,RH) = a \cdot T + b \cdot P_{vap} - c \quad (3.1)$$

Dove:

- T è la temperatura interna della stanza in [°C];
- P_{vap} è la pressione di vapore, espresso in [hPa] ed è calcolato con la pressione di saturazione (P_{sat}) e l'umidità relativa con la seguente formula:

$$P_{vap} = P_{sat} \cdot \frac{RH}{100} \quad [hPa] \quad (3.2)$$

$$P_{sat} = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot T}{T+243,5}} \quad [hPa] \quad (3.3)$$

- I coefficiente a, b, c sono dei coefficienti che variano in funzione della stagione [19], come mostrato in tabella 3.1.

Tabella 3.1: coefficienti stagionale per il calcolo dell'sPMV.

Mese	1 - 3	4 - 5	6 - 8	9 - 11	12
a	0,1478	0,1383	0,2803	0,1383	0,1478
b	-0,1371	0,0269	0,1717	0,0269	-0,1371
c	2,5239	3,0190	7,1383	3,0190	2,5239

I range per ogni categoria di comfort termico, in accordo con la ENI ISO 7726 [18] , sono i seguenti:

- Categoria I: zone con speciali requisiti (persone fragili, persone malate, infanti, persone anziane): $PMV_{lim} = \pm 0,2$;
- Categoria II: edifici di nuova costruzione: $PMV_{lim} = \pm 0,5$;
- Categoria III: edifici esistenti: $PMV_{lim} = \pm 0,7$;

- Categoria IV: accettabile per un periodo limitato di tempo: $PMV_{lim} > 0,7$.

I valori orari di sPMV hanno bisogno di un valore limite per identificare il numero di ore occupate al di fuori di un intervallo di comfort scelto [18].

L'iter adoperato è il seguente:

1. Per ogni stanza dell'edificio si calcola l'sPMV_{h,i} orario.
2. Scelto il limite di categoria di comfort come da normativa, si calcola il numero di ore al di fuori della categoria di comfort scelta ($h_{or,i}$) quando il $|sPMV_{h,i}| \geq |PMV_{lim}|$.
3. Si calcola la percentuale di ore al di fuori della categoria di comfort POR[%]:

$$POR_i = \frac{h_{or,i}}{h_{tot}} \cdot 100 [\%] \quad (3.4)$$

dove h_{tot} sono le ore durante la stagione di riscaldamento

Il POR viene quindi utilizzato per determinare il KPI. Un POR dello 0% corrisponde a un KPI del 100%, che è il miglior valore ottenibile. Un KPI pari al 100% significa che l'indicatore è sempre entro i limiti della categoria di comfort scelta. È considerata accettabile una deviazione massima pari al 5% del POR. Pertanto, per POR pari o superiore al 5%, il KPI corrispondente è 0% (caso peggiore), il che significa che l'edificio funziona per un periodo significativo al di fuori dei limiti della categoria target (Categoria II).

Per definire una scala di valutazione, si adoperava un'interpolazione lineare tra il POR minimo (5%) e il POR migliore (0%) per determinare una scala del KPI compresa tra 0% (caso peggiore) e 100% (caso migliore).

Indoor air quality (IAQ) CO₂, PM10 e PM2,5

In accordo con la normativa EN 16789 i limiti di CO₂ ammessi sono riportati in tabella 3.2 [8].

Tabella 3.2: range di comfort per la CO₂.

Categoria	Descrizione	CO ₂ Range [ppm]
I	Spazio con particolari requisiti (persone malate, anziani, bambini etc)	0 - 550
II	Edifici nuovi o ristrutturati	550 - 800

III	Edifici esistenti	800 - 1350
IV	Accettabile per un breve periodo	>1350

I valori orari di concentrazione di CO₂ al di sopra della concentrazione di CO₂ esterna vengono valutati rispetto a un valore limite di sicurezza per identificare il numero di ore al di fuori di un intervallo di comfort accettabile (Categoria II). L'iter adoperato è il seguente:

1. Data una stanza, si calcola la concentrazione oraria di CO₂ media $CO_{2,indoor,i}$ [ppm].
2. Per ogni valore di $CO_{2,indoor,i}$ si calcola la concentrazione di CO₂ al di sopra della concentrazione di CO₂ esterna:

$$CO_{2,above,i} = CO_{2,indoor,i} - 360 \text{ [ppm]} \quad (3.5)$$

3. Definito il limite per la CO₂, si calcolano il numero di ore in cui la stanza è al di fuori di quel valore $CO_{2,lim,inf} \leq CO_{2,above,i} \leq CO_{2,lim,sup}$
4. La percentuale di ore al di fuori di quella categoria POR_i [%] è calcolato come riportato nell'equazione 3.4.

Il POR viene quindi utilizzato per determinare il KPI. È considerata accettabile una deviazione massima pari al 5% del POR. Pertanto, per POR pari o superiore al 5%, il KPI corrispondente è 0% (caso peggiore), il che significa che l'edificio funziona per un periodo significativo al di fuori dei limiti della categoria target (Categoria II).

Per definire una scala di valutazione, si adoperava un'interpolazione lineare tra il POR minimo (5%) e il POR migliore (0%) per determinare una scala del KPI compresa tra 0% (caso peggiore) e 100% (caso migliore).

Per quanto riguarda il KPI.IAQ relativo al PM10 e PM2,5, la metodologia per la loro valutazione è fornita dal Victoria EPA Institute (Australia). I limiti per ogni categoria [8] sono riportati in tabella 3.3 e 3.4.

Tabella 3.3: range di comfort per il PM10.

Categoria	Descrizione	PM10 range [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
I	Spazio con particolari requisiti (persone malate, anziani, bambini etc)	0-26,3
II	Edifici nuovi o ristrutturati	26,4-52,7

III	Edifici esistenti	52,8-79,9
IV	Accettabile per un breve periodo	>80

Tabella 3.4: range di comfort per il PM2,5.

Categoria	Descrizione	PM2,5 range [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
I	Spazio con particolari requisiti (persone malate, anziani, bambini etc)	0-13,1
II	Edifici nuovi o ristrutturati	13,1 – 26,3
III	Edifici esistenti	26,4 – 39,9
IV	Accettabile per un breve periodo	>40

I passaggi per il calcolo del KPI sono i seguenti:

1. Per la stanza selezionata nell'edificio, viene calcolata la concentrazione media oraria di PM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] a partire dai campioni misurati.
2. Viene calcolato il numero di ore occupate all'interno di ciascuna categoria di intervallo mostrata sopra ($h_{ir,i}$) come il numero di ore in cui $PM_{\text{lim,inf}} \leq PM \leq PM_{\text{lim,sup}}$.
3. La percentuale di ore all'interno dell'intervallo scelto $PIR_i[\%]$ viene calcolata utilizzando l'Equazione 3.4.

Il PIR viene quindi utilizzato per determinare il KPI. Una deviazione massima del 5% del PIR è considerata accettabile. Pertanto, per un PIR pari o superiore al 5%, il KPI corrispondente è 0% (peggiore caso), il che significa che l'edificio opera per un periodo significativo al di fuori dei limiti della categoria target (Buono).

Per definire una scala di valutazione, si adopera un'interpolazione lineare tra il PIR minimo (5%) e il miglior PIR (0%) per determinare una scala del KPI tra 0% (peggiore caso) e 100% (migliore caso).

KPI Energetici

Richiesta di energia primaria (KPI.PED)

Partendo dai profili di consumo energetico dell'edificio scorporato nelle varie categorie energetiche, mediante dei coefficienti di conversione riportati nelle tabelle 3.5 [14] e 3.6 [20] è possibile ottenere i KPI.PED per ogni vettore energetico.

Tabella 3.5: tabella in cui sono riportati per ogni vettore energetico i fattori di conversione.

Energy source	Factor	Factor	Factor _{total}
	renewable	non-renewable	
National conventional electricity	0.396	2.007	2.403
Peninsular conventional electricity	0.414	1.954	2.368
Diesel fuel for heating	0.003	1.179	1.182
LPG	0.003	1.201	1.204
Natural gas	0.005	1.190	1.195
Coal	0.002	1.082	1.084
Un-densified biomass	1.003	0.034	1.037
Densified biomass (Pellets)	1.028	0.085	1.113

Tabella 3.6: tabella in cui sono riportati per ogni paese europeo i fattori di conversione energetica.

Energy carrier	Metrics	Austria	Denmark	Finland	Germany	Italy	Sweden	Switzerland
Electricity	Non-renewable	1.3	-	1.7	2.6	2.18	-	2.53
	Total	1.91	2.5	1.7	3	-	1.5	2.97
Natural gas	Non-renewable	1.12	-	1	1.1	1	-	1.1
	Total	1.12	1	1	1.1	-	-	1.15
Oil	Non-renewable	1.11	-	1	1.1	1	-	1.15
	Total	1.13	1	1	1.1	-	1.2	1.24
Wood, pieces	Non-renewable	0.01	-	0.5	0.2	0	-	0.05
	Total	1.01	1	0.5	1.2	-	1.2	1.06
Wood, pellets	Non-renewable	0.14	-	0.5	0.2	0	-	0.3
	Total	1.16	1	0.5	1.2	-	1.2	1.22
District heat 70% CHP (fossil)	Non-renewable	0.76	-	-	0.7	-	-	0.81
	Total	0.77	1	0.7	0.7	-	0.9	0.8

$$KPI.PED_{el} = consumo_{el} \cdot ped_{factor} \quad [\text{kWh/m}^2 \text{ annuo}] \quad (3.6)$$

$$KPI.PED_h = consumo_h \cdot ped_{factor} \quad [\text{kWh/m}^2 \text{ annuo}] \quad (3.7)$$

$$KPI.PED_c = consumo_c \cdot ped_{factor}. \quad [\text{kWh/m}^2 \text{ annuo}] \quad (3.8)$$

dove:

- ped_{factor} sono i fattori di conversione dell'energia primaria come riportati nelle tabelle 3.5 e 3.6 in funzione del tipo di vettore energetico e del tipo di generatore.
- consumo sono i valori estrapolati dai dataframe di riferimento dividendoli in base al tipo di vettore energetico.

Energia risparmiata (KPI.TES)

Questo indice definisce la quantità di energia risparmiata grazie all'efficientamento energetico. Ottenuto calcolando la differenza tra il consumo energetico dell'edificio prima e dopo l'efficientamento in termini di energia primaria [15]. Misurato in kWh/m² annuo.

$$TES = C_{br} - C_{ar} \left[\frac{kWh}{m^2 year} \right] \quad (3.9)$$

Dove:

- TES è la quantità di energia risparmiata in [kWh/m² annuo];
- C_{br} è il consumo energetico prima dell'efficientamento energetico in [kWh/m² annuo];
- C_{ar} è il consumo energetico dopo l'efficientamento energetico in [kWh/m² annuo].

KPI Economico (KPI.ACOSE)

Questo indice definisce quanto è stato il risparmio monetario da parte dell'azienda a seguito dell'efficientamento energetico [16].

È calcolato prendendo il TES e moltiplicato per il costo dell'energia, tenendo conto anche del paese europeo preso in esame:

$$ACOSE = C * TES \left[\frac{kWh}{m^2 year} \right] \quad (3.10)$$

dove:

- ACOSE è la quantità di denaro risparmiato [€/anno];
- C è il costo dell'energia [€ m²/kWh];
- TES [kWh/m²annuo] è la quantità di energia risparmiata dopo l'efficientamento energetico.

KPI ambientale (KPI.GWP)

Questo indice è stato scelto per definire la quantità di CO₂ equivalente non emessa grazie all'efficientamento energetico [16], [17].

Partendo dalla quantità di energia primaria richiesta, per l'elettricità, il riscaldamento e il raffrescamento, prima e dopo l'efficientamento energetico, è possibile calcolare la quantità di CO₂ non emessa moltiplicando il valore ottenuto dalla differenza dell'energia primaria prima e dopo l'efficientamento energetico e il fattore di emissione equivalente per il paese di riferimento, come riportato nella seguente formula:

$$GWP = (PED_{be} - PED_{ae}) \times K \quad (3.11)$$

Dove:

- GWP è la quantità di CO₂ non emessa per l'i-esimo vettore energetico espressa in [kg/anno];
- PED_{be} è l'energia primaria dell'i-esimo vettore energetico prima dell'efficientamento espresso in [kWh/m²anno];
- PED_{ae} è l'energia primaria dell'i-esimo vettore energetico dopo l'efficientamento energetico espresso in [kWh/m²anno];
- K è il fattore equivalente di CO₂ espresso in [kg/kWh] come riportato in tabella 3.7.

Tabella 3.7: tabella in cui sono riportati i fattori di CO₂ equivalenti per i vari paesi europei [Covenant of Mayors].

Nation	CO ₂ factor [kg/kWh]
Austria	0.209
Belgium	0.285
Germany	0.624
Denmark	0.461
Spain	0.440
Finland	0.216
France	0.056
United Kingdom	0.543
Greece	1.149
Ireland	0.732
Italy	0.483
Netherlands	0.435
Portugal	0.369
Sweden	0.023
Bulgaria	0.819
Cyprus	0.874
Czech Republic	0.950
Estonia	0.908

Nation	CO ₂ factor [kg/kWh]
Hungary	0.566
Lithuania	0.153
Latvia	0.109
Poland	1.191
Romania	0.701
Slovenia	0.557
Slovakia	0.252
EU-27	0.460

3.1.1 – Pilot FVH

La metodologia appena spiegata è stata adoperata sui dati provenienti da FVH. FVH è una società che gestisce un complesso di edifici, tra cui uffici, scuole, centri di assistenza sanitaria, ecc... in figura 2 è riportato l'edificio preso in esame. Nel dettaglio FVH è un edificio adibito ad uffici, costruito nel 2020. È costituito da 7 piani per una superficie totale di 35 261 m².



Figura 2: foto di FVH

L'obiettivo principale di FVH è valutare ed implementare metodi moderni di integrazione dei dati, tenendo in considerazione la sicurezza dei dati, l'interoperabilità semantica e la natura dinamica dei sistemi di automazione degli edifici. Tutto ciò per avere dati che forniscano informazioni sul comportamento degli occupanti, sui profili di utilizzo e sulla percezione del comfort da parte degli utenti.

Per questa società si è passati ad estrarre i dati dei sensori disponibili per ogni stanza, richiedendoli mediante query ad un database principale InfluxDB, in cui sono caricati i dati di tutti i pilot facenti parte del progetto DigiBUILD. I dati estrapolati sono riferiti al periodo dal 01-06-2023 al 30-06-2024.

Dopo aver estratto i dati opportuni, si è proceduto con la realizzazione dei vari dataframe di riferimento, di modo tale da avere dati di più facile gestione. Inizialmente i dati erano caricati con una cadenza di ogni 10 minuti, 20 minuti e anche ogni ora. Per rendere questi dati eterogenei, il più possibile omogenei per i calcoli da realizzare, si è seguito il seguente iter. I dati di temperatura, umidità relativa e quantità di CO₂ caricati con cadenza di 10 minuti, come mostrato nella tabella 3.8, sono stati raggruppati con cadenza oraria mediando i dati disponibili come mostrato nella tabella 3.9. Analogamente per i dati della concentrazione di PM10 e PM2,5 con cadenza di 20 minuti. Nelle tabelle da 3.8 a 3.17 sono riportati degli estratti dei dataframe.

Mentre per i dati di consumo dell'energia elettrica, riscaldamento e tele-raffreddamento sono stati realizzati direttamente i dataframe di riferimento in quanto già caricati sul database con cadenza oraria.

Tabella 3.8: estratto dei dati di temperatura con cadenza ogni 10 minuti appena estrapolati dal database InfluxDB.

DATE	ROOM	INDOORT [°C]
01/06/2023 00:00:00	134	22,28
01/06/2023 00:10:00	134	22,39
01/06/2023 00:20:00	134	22,28

Tabella 3.9: dati di temperatura con cadenza oraria.

DATE	ROOM	INDOORT [°C]
01/06/2023 00:00:00	134	22,30
01/06/2023 01:00:00	134	22,25
01/06/2023 02:00:00	134	22,23

Tabella 3.10: estratto dei dati di umidità relativa con cadenza ogni 10 minuti appena estrapolati dal database InfluxDB.

DATE	ROOM	RH [%]
01/06/2023 00:00:00	134	35
01/06/2023 00:10:00	134	35
01/06/2023 00:20:00	134	35

Tabella 3.11: dati di umidità relativa con cadenza oraria.

DATE	ROOM	RH [%]
01/06/2023 00:00:00	134	35
01/06/2023 01:00:00	134	35
01/06/2023 02:00:00	134	35

Tabella 3.12: estratto dei dati di CO₂ con cadenza ogni 10 minuti appena estrapolati dal database InfluxDB.

DATE	ROOM	CO ₂ [ppm]
01/06/2023 00:00:00	312	429,00
01/06/2023 00:10:00	312	428,00
01/06/2023 00:20:00	312	428,00

Tabella 3.13: dati di CO₂ con cadenza oraria.

DATE	ROOM	CO ₂ [ppm]
01/06/2023 00:00:00	312	427,83
01/06/2023 01:00:00	312	402,00
01/06/2023 02:00:00	312	409,17

Tabella 3.14: estratto dei dati di PM10 con cadenza ogni 20 minuti appena estrapolati dal database InfluxDB.

DATE	ROOM	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
01/06/2023 00:00:00	109	4,45
01/06/2023 00:20:00	109	4,70
01/06/2023 00:40:00	109	5,50

Tabella 3.15: dati di PM10 con cadenza oraria.

DATE	ROOM	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
01/06/2023 00:00:00	109	4,88
01/06/2023 01:00:00	109	4,83
01/06/2023 02:00:00	109	4,45

Tabella 3.16: estratto dei dati di PM2,5 con cadenza ogni 20 minuti appena estrapolati dal database InfluxDB.

DATE	ROOM	PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
01/06/2023 00:00:00	109	4,70
01/06/2023 00:20:00	109	5,00
01/06/2023 00:40:00	109	4,45

Tabella 3.17: dati di PM2,5 con cadenza oraria.

DATE	ROOM	PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
01/06/2023 00:00:00	109	4,72
01/06/2023 01:00:00	109	4,33
01/06/2023 02:00:00	109	5,10

Dopodiché per una migliore gestione dei dati e per facilitare i calcoli dei rispettivi indici prestazionali, si è proceduto ad unire in un unico dataframe di riferimento i dati disponibili, differenziando i dataframes in base alla destinazione d'uso.

Realizzando un dataframe di riferimento con cui calcolare i KPI's relativi al comfort termico e alla qualità dell'aria come mostrato in tabella 3.18; ed un secondo dataframe di riferimento adoperato per calcolare i KPI's energetici, economici e di sostenibilità come mostrato in tabella 3.19.

Tabella 3.18: estratto del dataframe di riferimento per il calcolo dei KPI's relativi al comfort termico e alla qualità dell'aria.

DATE	ROOM	INDOORT [°C]	CO ₂ [ppm]	RH [%]	PM10 [µg/m ³]	PM2,5 [µg/m ³]
01/06/2023 00:00:00	134	22,30	0,00	35	0,00	0,00
01/06/2023 01:00:00	134	22,25	0,00	35	0,00	0,00
01/06/2023 02:00:00	134	22,23	0,00	35	0,00	0,00

Tabella 3.19: estratto del dataframe di riferimento per il calcolo dei KPI's energetici.

DATE	ELECTRICITY [kWh]	HEATING [kWh]	DISTRICOOLING [kWh]
01/06/2023 00:00:00	154,03	120,00	100,00
01/06/2023 01:00:00	243,60	120,00	100,00
01/06/2023 02:00:00	250,85	200,00	100,00

3.2 Calcolo dell'Indoor Global Comfort Index

L'indoor global comfort index (IGCI) è un parametro che permette di tenere conto delle categorie di comfort disponibili per un generico edificio.

Su questa base si è proceduti a prendere una stanza di riferimento in cui fossero disponibili i dati d'interesse e realizzare il dataframe di partenza con i dati necessari al calcolo dell'IGCI.

Il modello di partenza per il calcolo del IGCI [21] è il seguente:

$$IGCI = 0.30 \times TC + 0.36 \times IAQ + 0.18 \times AC + 0.16 \times L \quad (3.12)$$

dove:

- TC è il comfort termico, nel nostro caso assunto pari al KPI.TC;
- IAQ è la qualità dell'aria, nel caso in questione assunto pari al KPI.IAQ;
- AC è il comfort acustico, nel nostro caso assunto pari al KPI.NOISE;
- L è il comfort visivo, nel nostro caso non disponibile.

Dalla formula sopra riportata, non è stato possibile calcolare il KPI visivo per mancanza di dati. A questo proposito è stato adoperato il Metodo della Ripartizione dei Pesi per permettere di utilizzare la formula dell'IGCI con i parametri disponibili.

3.3 Metodo per la Ripartizione dei Pesi

Per redistribuire i pesi di quattro categorie in tre, eliminandone una, è necessario ripartire il peso della categoria esclusa tra le rimanenti, mantenendo invariato il totale dei pesi. La redistribuzione avviene in modo proporzionale rispetto ai pesi iniziali delle categorie rimanenti. Il processo può essere descritto nei seguenti passi:

- Identificazione dei pesi iniziali: I pesi delle quattro categorie comfort vengono indicati come:
 - Categoria 1: W_1
 - Categoria 2: W_2
 - Categoria 3: W_3
 - Categoria 4: W_4
- Eliminazione di una categoria: supponendo che la categoria 4 venga eliminata. Di conseguenza, il peso W_4 deve essere redistribuito tra le altre tre categorie.
- Calcolo del peso totale rimanente: la somma dei pesi delle categorie rimanenti (Categorie 1, 2 e 3) è:

$$\text{Totale rimanente} = W_1 + W_2 + W_3$$

- Ridistribuzione del peso della categoria eliminata: il peso W_4 viene ripartito proporzionalmente ai pesi delle categorie rimanenti. Il nuovo peso di ciascuna categoria è dato dalla seguente formula:

$$W'_1 = W_1 + \frac{W_1}{W_1 + W_2 + W_3} * W_4$$

$$W'_2 = W_2 + \frac{W_2}{W_1 + W_2 + W_3} * W_4$$

$$W'_3 = W_3 + \frac{W_3}{W_1 + W_2 + W_3} * W_4$$

Con questo metodo è stato ottenuto il modello adoperato in questa tesi con solo le categorie di comfort disponibili, come riportato di seguito.

$$IGCI = 0,36 TC + 0,43 IAQ + 0,21 AC \quad (3.13)$$

dove:

- TC è il comfort termico, nel nostro caso assunto pari al KPI.TC;
- IAQ è la qualità dell'aria, nel caso in questione assunto pari al KPI.IAQ;
- AC è il comfort acustico, nel nostro caso assunto pari al KPI.NOISE.

Adoperando il modello per l'IGCI come riportato nella formula (3.13), si è calcolato il riferimento per il set di dati di partenza.

Successivamente mediante la simulazione Monte Carlo si è passati a definire il calcolo dell'incertezza associata a questo modello.

I dati simulati sono stati quelli di una settimana, nello specifico nel periodo dal 25-04-2024 al 02-05-2024.

3.4 Metodo Monte Carlo

Il Metodo Monte Carlo è una tecnica numerica basata su simulazioni casuali utilizzata per risolvere problemi complessi che potrebbero non avere una soluzione analitica diretta.

Il principio di base del Metodo Monte Carlo è generare una serie di numeri casuali o pseudo-casuali per simulare un processo e ottenere risultati che possono essere usati per stimare il valore atteso o la distribuzione di una variabile di interesse [22], [23], [24][25].

Le fasi tipiche del Metodo Monte Carlo includono:

- Modellazione del sistema: identificare le variabili chiave e il loro comportamento attraverso un modello matematico.
- Generazione di numeri casuali: creare variabili casuali che rappresentano le incertezze del sistema.
- Simulazione iterativa: ripetere il processo migliaia o milioni di volte per ottenere una stima accurata.
- Analisi dei risultati: le simulazioni forniscono una distribuzione di risultati da cui estrarre informazioni come la media e la varianza, utili per valutare l'incertezza.

Vantaggi del Metodo Monte Carlo:

- Accuratezza in modelli complessi: per sistemi o modelli che non possono essere facilmente linearizzati, il Metodo Monte Carlo fornisce una soluzione numerica che tiene conto della non linearità, producendo una stima accurata e una distribuzione dell'incertezza.
- Distribuzioni complesse: se le variabili in ingresso o gli errori non seguono una distribuzione normale (gaussiana), il Metodo Monte Carlo permette di gestire distribuzioni più complesse senza fare ipotesi limitative.

Procedura Monte Carlo secondo la GUM

Il Metodo Monte Carlo applicato nella GUM segue una procedura simile a quella generale del metodo, ma specificamente adattata al contesto delle misurazioni:

- Modello matematico: definire il modello di misura che descrive come le variabili di ingresso influenzano la variabile di output.
- Distribuzioni di ingresso: assegnare distribuzioni di probabilità alle variabili di ingresso, con l'incertezza associata a ciascuna delle variabili di input.
- Generazione dei campioni: generare un ampio numero di campioni casuali (tipicamente da 10.000 a 1.000.000) per le variabili di ingresso.
- Calcolo dei risultati: per ogni set di campioni, calcolare il valore dell'output utilizzando il modello di misura.
- Valutazione dell'incertezza: analizzare i risultati per ottenere la distribuzione dell'output e stimare la sua incertezza. Questo include la valutazione della media e altre proprietà statistiche della distribuzione.

Vantaggi del Monte Carlo nella GUM

- Generalità: è applicabile a qualsiasi modello, sia esso lineare o non lineare.
- Flessibilità: gestisce variabili di ingresso con distribuzioni arbitrarie e tiene conto di correlazioni tra le variabili.

- Precisione: fornisce una stima accurata della distribuzione del valore di output e dell'incertezza anche per sistemi complessi.
- Visualizzazione diretta dell'incertezza: permette di ottenere la distribuzione completa dei risultati dell'output, invece di una singola stima con incertezza, offrendo una comprensione più completa del problema.

Nel caso specifico il modello adoperato è quello riportato nella formula (3.13), le distribuzioni dei parametri d'ingresso sono le seguenti:

- Temperatura: distribuzione logonormale;
- Umidità relativa: distribuzione gaussiana (o normale);
- CO₂: distribuzione normale;
- Noise: distribuzione normale.

Il numero di simulazioni adoperato nella seguente tesi è di N=10 000, nato dal compromesso di ottenere un numero elevato di campioni simulati e tempo computazionale.

Con questi dati di partenza è stato simulato per N volte il seguente procedimento:

1. Si generano i quattro vettori errori (ϵ) di lunghezza pari a 10^6 . Uno per ogni categoria di riferimento, di modo tale che abbiano le stesse distribuzioni dei dati storici, e come parametri vengono attribuiti media nulla e deviazione standard pari all'incertezza del sensore adoperato;

Tabella 3.20: incertezze dei sensori adoperati, nello specifico è stato usato il sensore Netatmo.

Sensore	Incertezza
Temperatura	± 0.3 [°C]
Umidità relativa	$\pm 3\%$
CO ₂	± 100 [ppm]
Noise	± 0.7 [dB]

2. Dai vettori errore si seleziona in modo casuale un vettore errore di lunghezza pari a quello del dato storico (T_{rif} , RH_{rif} , $CO_{2,rif}$, $Noise_{rif}$) e lo si somma a quest'ultimo, di modo tale da ottenere un segnale simulato (T_{sim} , RH_{sim} , $CO_{2,sim}$, $Noise_{sim}$):

$$T_{sim} = T_{rif} + \epsilon_t$$

$$RH_{sim} = RH_{rif} + \epsilon_{rh}$$

$$CO_{2,sim} = CO_{2,rif} + \epsilon_{co2}$$

$$Noise_{sim} = Noise_{rif} + \epsilon_{noise}$$

3. Una volta ottenuti i quattro vettori di dati simulati, sono stati calcolati i rispettivi KPI's adoperati per calcolare volta per volta l'IGCI.

Il KPI di comfort termico (KPI.TC) è calcolato definendo prima l'sPMV (mediante l'equazione 3.1) e successivamente si è adoperato il metodo per il calcolo dei KPI's come spiegato nella prima parte di questo capitolo. Per il calcolo del KPI.IAQ per la CO₂ il procedimento è analogo.

Mentre per il calcolo del KPI.NOISE si è proceduto nel seguente modo:

- Per ogni stanza, in base alla propria destinazione d'uso e in base alla classe dell'edificio, sono definiti i range per categoria di comfort [11], [26] come mostrato nella tabella 3.21.

Tabella 3.21: range di comfort acustico, in funzione della destinazione d'uso della stanza e della categoria dell'edificio.

Type of space	Class A	Class B	Class C	Class D	Class E
Bedroom	$L_{Aeq} \leq 30$	$30 < L_{Aeq} \leq 32.5$	$32.5 < L_{Aeq} \leq 35$	$35 < L_{Aeq} \leq 40$	$L_{Aeq} > 40$
Living room / kitchen	$L_{Aeq} \leq 35$	$35 < L_{Aeq} \leq 37.5$	$37.5 < L_{Aeq} \leq 40$	$40 < L_{Aeq} \leq 45$	$L_{Aeq} > 45$
Hotel bedroom	$L_{Aeq} \leq 35$	$35 < L_{Aeq} \leq 37.5$	$37.5 < L_{Aeq} \leq 40$	$40 < L_{Aeq} \leq 45$	$L_{Aeq} > 45$
Classroom	$L_{Aeq} \leq 35$	$35 < L_{Aeq} \leq 37.5$	$37.5 < L_{Aeq} \leq 40$	$40 < L_{Aeq} \leq 45$	$L_{Aeq} > 45$
Nursery school	$L_{Aeq} \leq 40$	$40 < L_{Aeq} \leq 42.5$	$42.5 < L_{Aeq} \leq 45$	$45 < L_{Aeq} \leq 50$	$L_{Aeq} > 50$
Office	$L_{Aeq} \leq 35$	$35 < L_{Aeq} \leq 37.5$	$37.5 < L_{Aeq} \leq 40$	$40 < L_{Aeq} \leq 45$	$L_{Aeq} > 45$
Conference room	$L_{Aeq} \leq 35$	$35 < L_{Aeq} \leq 37.5$	$37.5 < L_{Aeq} \leq 40$	$40 < L_{Aeq} \leq 45$	$L_{Aeq} > 45$
Hospital	$L_{Aeq} \leq 35$	$35 < L_{Aeq} \leq 37.5$	$37.5 < L_{Aeq} \leq 40$	$40 < L_{Aeq} \leq 45$	$L_{Aeq} > 45$
Retail shop	$L_{Aeq} \leq 45$	$45 < L_{Aeq} \leq 47.5$	$47.5 < L_{Aeq} \leq 50$	$50 < L_{Aeq} \leq 55$	$L_{Aeq} > 55$

- Viene calcolato il numero di ore occupate all'interno di ciascuna categoria di intervallo mostrata sopra ($h_{ir,i}$) come il numero di ore in cui :

$$NOISE_{lim,inf} \leq NOISE \leq NOISE_{lim,sup}$$

- La percentuale di ore all'interno dell'intervallo di comfort scelto $PIR_i[\%]$ viene calcolata utilizzando l'Equazione 3.4.
- Il PIR viene quindi utilizzato per determinare il KPI. Una deviazione massima del 5% del PIR è considerata accettabile. Pertanto, per un PIR pari o superiore al 5%, il KPI corrispondente è 0% (peggiore caso), il che significa che l'edificio opera per un periodo significativo al di fuori dei limiti della categoria target (Classe B).

Per definire una scala di valutazione, si adopera un'interpolazione lineare tra il PIR minimo (5%) e il miglior PIR (0%) per determinare una scala del KPI tra 0% (peggiore caso) e 100% (migliore caso).

Dopo aver calcolato per l'i-esima simulazione i KPI's necessari, si calcola l'IGCI_i.

4. Successivamente è stato salvato tutto in un file csv, costituito da N valori di IGCI.
5. Si è calcolata l'incertezza del IGCI come da GUM, prendendo il file con gli N IGCI simulati e sottraendovi l'IGCI di riferimento. Mediante il calcolo della deviazione standard degli scostamenti è stata definita l'incertezza del modello adoperato:

$$U_{igci} = \text{std} \begin{bmatrix} (IGCI_{sim} - IGCI_{rif})_1 \\ (IGCI_{sim} - IGCI_{rif})_2 \\ (IGCI_{sim} - IGCI_{rif})_n \end{bmatrix}$$

6. Infine, è stata realizzata un'analisi di sensibilità per comprendere al meglio quale tra temperatura e umidità relativa impattasse maggiormente sul IGCI.

3.5 Analisi di sensibilità

L'analisi di sensibilità è una tecnica utilizzata per determinare quanto le incertezze nelle variabili di ingresso influenzano l'incertezza complessiva di un risultato. Nel contesto della GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)[22], l'analisi di sensibilità è un passo fondamentale nella valutazione dell'incertezza di misura, poiché permette di identificare le variabili più critiche che contribuiscono all'incertezza totale.

La GUM suggerisce di propagare l'incertezza delle variabili di ingresso attraverso un modello di misura per ottenere l'incertezza combinata associata al misurando. L'analisi di sensibilità serve per comprendere come queste incertezze si distribuiscono tra le diverse variabili e quali di esse hanno il maggiore impatto sull'incertezza complessiva.

L'analisi di sensibilità ha due obiettivi principali:

- Identificare le variabili dominanti: scoprire quali variabili di ingresso (come temperatura, umidità relativa, ecc.) hanno il maggiore impatto sull'incertezza finale del risultato.
- Ottimizzare l'approccio di misurazione: se una variabile di ingresso ha un'influenza significativa sull'incertezza complessiva, si può decidere di migliorare il metodo di misurazione per quella variabile o ridurre l'incertezza associata, ottimizzando così l'intero processo.

La GUM definisce la propagazione dell'incertezza come il metodo per trasferire le incertezze associate a variabili di ingresso attraverso un modello di misura per ottenere l'incertezza associata al risultato.

Modello matematico

Il modello matematico nel caso più generico possibile ha la seguente forma:

$$Y = f(X_1 + X_2 + \dots + X_n)$$

dove:

- Y è l'output, ovvero il parametro che si vuole calcolare;
- X_1, X_2, \dots, X_n sono le variabili di ingresso che influenzano l'output;
- f è la funzione matematica che lega le variabili di ingresso all'output.

Le incertezze associate a ciascuna variabile di ingresso si propagano attraverso f , contribuendo all'incertezza combinata del risultato Y .

Nel caso specifico il modello adoperato è riportato nell'eq (3.12).

Quando il modello di misura è non lineare o quando le variabili di ingresso non seguono distribuzioni gaussiane, in questi casi, la GUM suggerisce l'uso del Metodo Monte Carlo per l'analisi di sensibilità [22]. Attraverso simulazioni

ripetute, il Metodo Monte Carlo permette di osservare direttamente l'effetto delle incertezze di ciascuna variabile di ingresso sulla variabile di output. Nello specifico il metodo adoperato è quello di Saltelli [27] in cui si calcola il coefficiente di sensibilità $c(x_i)$ con le varianze come segue:

$$c(x_i) = \frac{V(x_i)}{V(y)}$$

dove:

- $V(x_i)$ è la varianza del parametro di output (IGCI) che si vuole calcolare quando si simula solo un parametro e si mantengono costanti gli altri;
- $V(y)$ è la varianza del parametro di output (IGCI) che si vuole calcolare quando si simulano tutti i parametri contemporaneamente.

Nello specifico il procedimento è il seguente:

- Simulazione della temperatura simulata come riportato precedentemente;
- Gli altri parametri sono mantenuti costanti (presi dai dati storici);
- Con questi dati di temperatura simulata, CO₂ storico e Noise storico, si calcolano i rispettivi KPI's;
- Applicazione del modello per il calcolo dell'IGCI;
- Si calcolano gli scostamenti e la varianza nel caso solo temperatura simulata:

$$V_T = \text{var} \begin{bmatrix} (IGCI_{sim} - IGCI_{rif})1 \\ (IGCI_{sim} - IGCI_{rif})2 \\ (IGCI_{sim} - IGCI_{rif})n \end{bmatrix}$$

- Analogamente per il caso in cui si simulano tutti i parametri contemporaneamente, si avrà la varianza totale:

$$V_{TOT} = \text{var} \begin{bmatrix} (IGCI_{sim} - IGCI_{rif})1 \\ (IGCI_{sim} - IGCI_{rif})2 \\ (IGCI_{sim} - IGCI_{rif})n \end{bmatrix}$$

- Calcolo del coefficiente di sensibilità per la temperatura come rapporto tra le varianze:

$$c_T = \frac{V_T}{V_{TOT}} \quad (3.14)$$

- Lo stesso viene realizzato nel caso di simulazione della sola umidità relativa ottenendo il coefficiente di sensibilità annesso:

$$C_{RH} = \frac{V_{RH}}{V_{TOT}} \quad (3.15)$$

In figura 3.1 è riportato uno schema a blocchi che riassume i passaggi per l'analisi realizzata nella seconda parte della tesi.

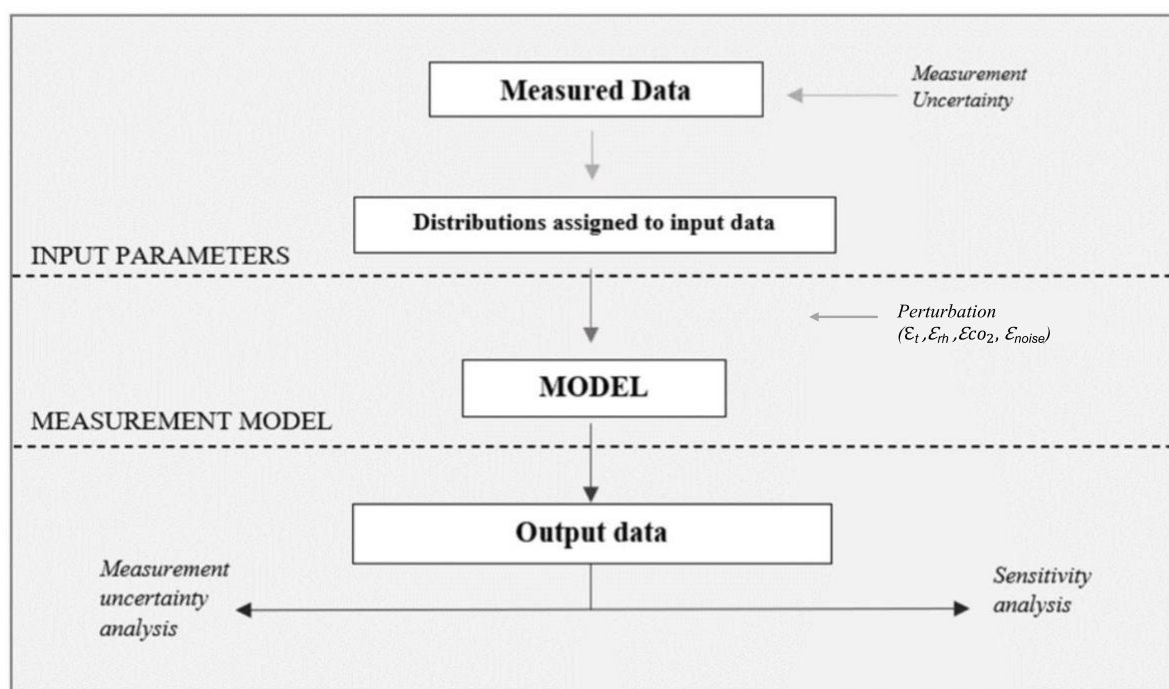


Figura 3.1: schema a blocchi che riassume i passaggi della simulazione con il metodo MC.

3.5.1 – Pilot IEECP

IEECP è un pilot composto da sei edifici adibiti ad uffici in cui sono installati sensori di misura della qualità dell'aria, sensori di misura dell'energia e sensori di misura dell'ambiente interno, con l'obiettivo di migliorare il comfort dei propri edifici. Due dei sei edifici sono situati nei Paesi Bassi e gli altri quattro in Grecia. La superficie complessiva del pilot è superiore ai 750 m². Inoltre i seguenti pilot hanno implementato sistemi rinnovabili. In figura 3 è riportato uno schema del pilot.

PILOT 8: IEECP

NEBs Financing Renovations

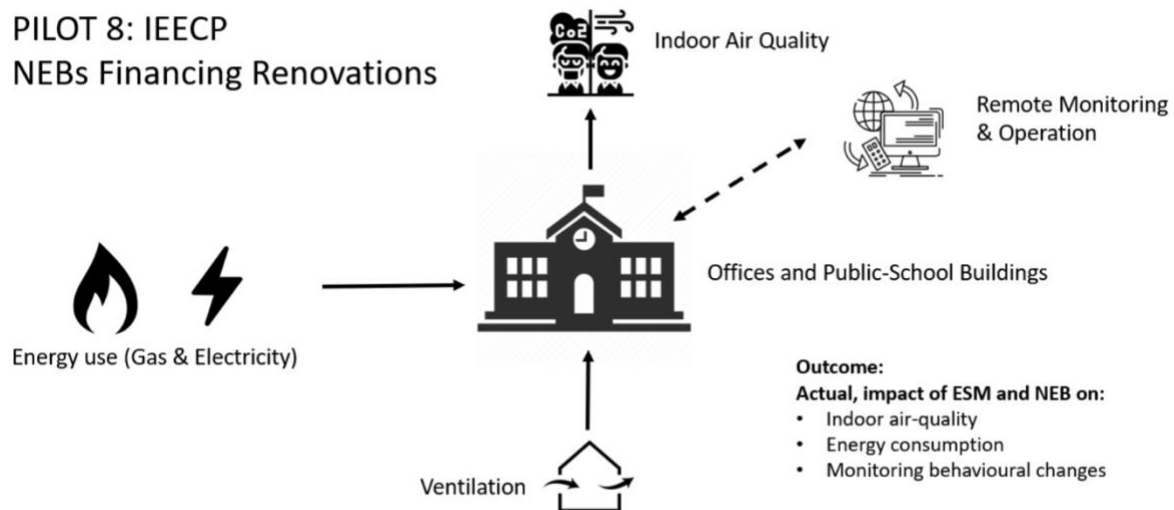


Figura 3: schema del pilot IEECP

Per questo pilot è stato calcolato l'IGCI come descritto precedentemente e successivamente mediante simulazione Monte Carlo l'incertezza del modello adoperato. Infine, un'analisi di sensibilità è stata realizzata per attribuire il peso che la temperatura e l'umidità relativa hanno sull'IGCI.

Capitolo 4 – Risultati e discussione

Nel seguente capitolo sono riportati i risultati ottenuti dalle varie analisi. Anche in questo capitolo come in quello precedente, si è proceduto a suddividerlo in due parti. La prima parte concerne i risultati relativi al pilot FVH, mentre la seconda parte riguarda i risultati per il pilot IEECP.

4.1 Pilot 1 – FVH

In questa parte relativa al pilot FVH vengono riportati i KPI calcolati, differenziando tra KPI di comfort termico, qualità dell'aria, energetici, economici e di sostenibilità.

4.1.1 Comfort termico

Il comfort termico è stato calcolato solo per la stanza 134 in quanto era l'unica stanza che avesse i dati di temperatura e umidità relativa disponibili contemporaneamente.

Per calcolare il comfort termico, come riportato nel capitolo precedente, si è adoperato un modello di PMV semplificato (sPMV) ([eq 3.1](#)), che dipende principalmente da temperatura e umidità relativa.

Di seguito si è realizzato un dataframe con tutti i valori di sPMV come mostrato in tabella 4.1, e da questi si è poi passato, mediante un confronto con i limiti imposti dalla normativa, a determinare la percentuale di tempo in ogni categoria di comfort per la stanza in esame, come riportato nella figura 4.1 e il calcolo del relativo KPI.TC.

Tabella 4.1: estratto del dataframe per i dati di sPMV.

DATE	sPMV
01/06/2023,00:00:00	-0,51
01/06/2023,01:00:00	-0,52
01/06/2023,02:00:00	-0,52

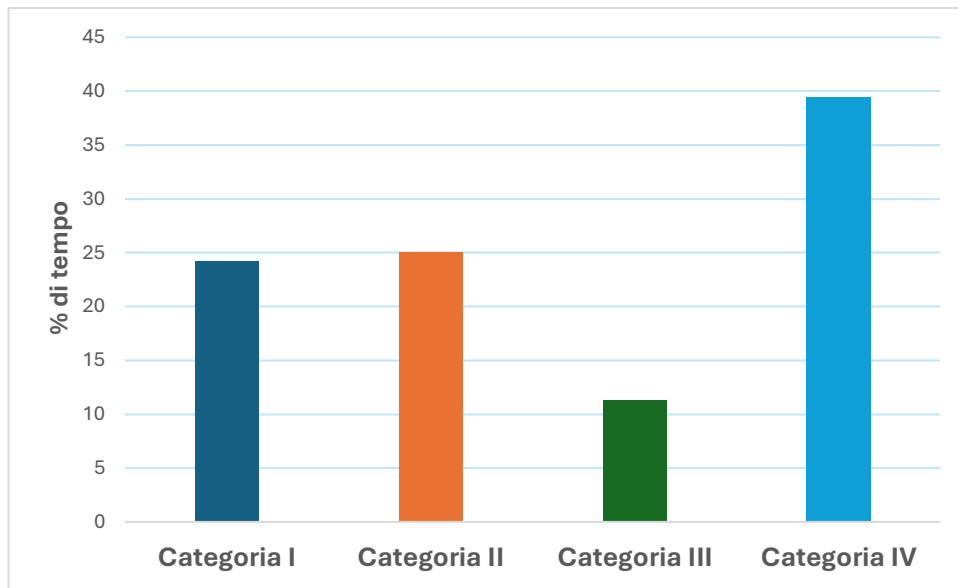


Figura 4.1: grafico a barre in cui sono riportati le percentuali di tempo per la stanza 134 nelle rispettive categorie di comfort.

Ciò che si evince dalla figura 4.1 è che per il 24% (categoria I) e 25% (categoria II) del periodo analizzato si può affermare che la stanza si trovi in condizioni di comfort, per il restante del periodo (categoria III e categoria IV) la stanza si trova in condizioni di discomfort attribuendo così un KPI pari a 0.

Pertanto, rimanendo a ciò che è riportato nella normativa, la stanza 134 non è in condizioni di comfort termico.

4.1.2 Qualità dell'aria (IAQ)

Questo è stato realizzato per i valori di CO₂, di PM10 e PM2,5.

Partendo dal dataframe di riferimento come mostrato nella tabella 3.18, si è calcolato la percentuale di tempo in cui ogni stanza è situata, secondo le specifiche riportate nella normativa e i relativi KPI, come mostrato nelle tabelle 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabella 4.2: qualità dell'aria, nello specifico CO₂, e le percentuali di tempo per le varie stanze nelle rispettive categorie di comfort con il KPI associato ad ogni stanza.

Room	Media CO ₂ [ppm]	Categoria I [%]	Categoria II [%]	Categoria III [%]	Categoria IV [%]	KPI [%]
110	426,39	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
117	437,77	100,0	0,1	0,0	0,0	100,0
121	431,17	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
129	410,98	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
301	424,64	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
312	449,86	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
313	453,98	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
326	422,14	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
330	440,56	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
333	430,27	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
334	434,3	99,9	0,0	0,0	0,0	99,0
338	463,56	99,6	0,4	0,1	0,0	98,0
348	449,46	99,9	0,1	0,0	0,0	100,0
355	439,89	99,7	0,3	0,1	0,0	98,0
356	459,57	99,8	0,1	0,0	0,1	98,0
357	435,58	100,0	0,1	0,0	0,0	100,0
358	438,16	99,9	0,1	0,1	0,0	98,0
360	431,65	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
361	443,28	99,9	0,0	0,1	0,0	99,0
362	449,69	99,9	0,1	0,0	0,0	100,0
363	446,02	100,0	0,1	0,0	0,0	100,0
364	460,78	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
365	434,43	99,9	0,0	0,1	0,0	98,0
366	434,84	99,9	0,0	0,0	0,1	98,0
368	435,65	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
369	441,57	99,9	0,0	0,1	0,0	98,0
370	439,63	99,9	0,0	0,0	0,0	100,0
371	455,62	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
372	447,69	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
375	444,51	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
378	449,99	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
379	428,32	99,9	0,1	0,0	0,0	100,0
380	430,59	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
458	497,09	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0

Tabella 4.3: qualità dell'aria, con focus sul PM10, e le percentuali di tempo per le varie stanze nelle rispettive categorie di comfort con il KPI annesso per ogni stanza.

Room	Media PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Categoria I [%]	Categoria II [%]	Categoria III [%]	Categoria IV [%]	KPI [%]
108	4,27	99,87	0,13	0,00	0,00	100,0
109	4,85	100,00	0,00	0,00	0,00	100,0
118	1,80	100,00	0,00	0,00	0,00	100,0
131	4,33	98,68	1,32	0,00	0,00	100,0
339	1,24	99,97	0,03	0,00	0,00	100,0

Tabella 4.4: qualità dell'aria, con focus sul PM2,5, e le percentuali di tempo per le varie stanze nelle rispettive categorie di comfort con il KPI annesso per ogni stanza.

Room	Media PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Categoria I [%]	Categoria II [%]	Categoria III [%]	Categoria IV [%]	KPI [%]
109	4,82	100,00	0,00	0,00	0,00	100,0
118	1,33	100,00	0,00	0,00	0,00	100,0
131	4,14	100,00	0,00	0,00	0,00	100,0
339	1,15	100,00	0,00	0,00	0,00	100,0

Ciò che si evince dalla tabella 4.2 è che per la quasi totalità del periodo analizzato le stanze sono in condizioni di comfort di categoria I, mentre per poche ore si trovano nelle altre categorie, ma come si evince dalla colonna IV, che rappresenta la categoria di discomfort, le percentuali in cui le varie stanze si trovano in quella situazione è prossima allo zero.

Dalla tabella 4.3 e 4.4, si evince in modo analogo che sia il PM10 che il PM2,5 si trovano prevalentemente in categoria I e molto poco in categoria II.

Definendo un'ottima qualità dell'aria interna per le stanze analizzate.

4.1.3 KPI energetici

I KPI's energetici calcolati sono stati di tre tipi. Il primo riguarda l'energia totale consumata dal pilot (KPI.TEC), come mostrato in tabella 4.5. Il secondo riguarda la quantità di energia primaria richiesta (KPI.PED), in cui noti i consumi energetici del pilot e noti i fattori di conversione relativi ad ogni vettore energetico è possibile calcolare il KPI, come mostrato in tabella 4.6.

Ed infine, si è calcolato anche la quantità di energia risparmiata dopo l'efficientamento energetico (KPI.TES), come mostrato in tabella 4.18.

Tabella 4.5: consumi del pilot FVH scorporate nei tre vettori energetici.

Electricity [kWh/m ² a]	Heating [kWh/m ² a]	Districtcooling [kWh/m ² a]
37,16	70,06	27,44

Tabella 4.6: energia primaria necessaria al pilot, con i rispettivi coefficienti di conversione.

Electricity [kWh/m ² a]	Electricity factor	Heating [kWh/m ² a]	Heating factor	Districtcooling [kWh/m ² a]	Districtcooling Factor
63,17	1,7	100,09	0,7	39,2	0,7

Tabella 4.7: risparmio di energia primaria.

Data	Primary energy demand (PED) [kWh/m ² a]
01/09/2022 – 01/06/2023	455,99
02/06/2023-05/05/2024	202,45
Total energy saving	253,54

Dalla tabella 4.5 si evincono i risultati di consumo del pilot, tenendo conto della normalizzazione dei risultati per l'area dell'edificio.

Dalla tabella 4.6 si evince la quantità di energia primaria totale di cui il pilot si deve approvvigionare per garantire l'energia necessaria. Per completezza dei dati sono stati riportati i fattori di conversione dell'energia come da documentazione di riferimento.

Infine, dalla tabella 4.7, sono riportati i quantitativi di energia primaria richiesta dal pilot prima e dopo l'efficientamento, con il relativo quantitativo di energia risparmiata grazie all'efficientamento energetico realizzato.

4.1.4 KPI economici

Questo KPI è stato calcolato per quantificare il denaro risparmiato grazie all'efficiamento energetico, come riportato in tabella 4.8.

Tabella 4.8: costo dell'energia annuale risparmiata.

Total energy saving [kWh/m² a]	Costo dell'energia [€ m²/kWh]	Costo dell'energia annuale risparmiata [€ /a]
253,54	22,52	5709

Nella tabella 4.8 è stato ripreso il valore di energia risparmiata, il costo dell'energia come da documentazione ed è stato calcolato il corrispettivo di denaro risparmiato.

4.1.5 KPI di sostenibilità

In questo KPI è stato calcolato il quantitativo di energia risparmiata per ogni vettore energetico, di modo tale da poter ottenere i quantitativi di CO₂ non emessi grazie all'efficiamento energetico realizzato. Ciò è riportato nella tabella 4.9 per ogni vettore energetico.

Tabella 4.9: quantità di CO₂ annua non emessa dopo l'efficiamento energetico.

Categoria energetica	Emissioni di CO₂ [kg CO₂/a]
Electricity	37,67
Heating	15,51
Districtcooling	1,68

4.2 Pilot 2 – IEECP

In questa parte relativa al pilot IEECP vengono riportati i risultati ottenuti, tra calcolo del IGCI e analisi di sensibilità.

4.2.1 IGCI

Come riportato nel capitolo 3, la prima parte è stata realizzata calcolando il dataframe di riferimento. Dati i valori storici di temperatura (figura 4.2), umidità relativa (figura 4.3), CO₂ (figura 4.4) e noise (figura 4.5), sono stati calcolati i KPI's annessi e successivamente il parametro globale come mostrato in tabella 4.10.

I dati adoperati sono relativi ad una sola settimana dal 25-04-2024 al 02-05-2024.

Tabella 4.10: valori di riferimento

KPI.TC [%]	KPI.IAQ [%]	KPI.NOISE [%]	IGCI [%]
87,0	0,0	0,0	31,32

I parametri d'ingresso sono stati simulati mediante il metodo Monte Carlo ottenendo dei segnali come riportati in figura 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9.

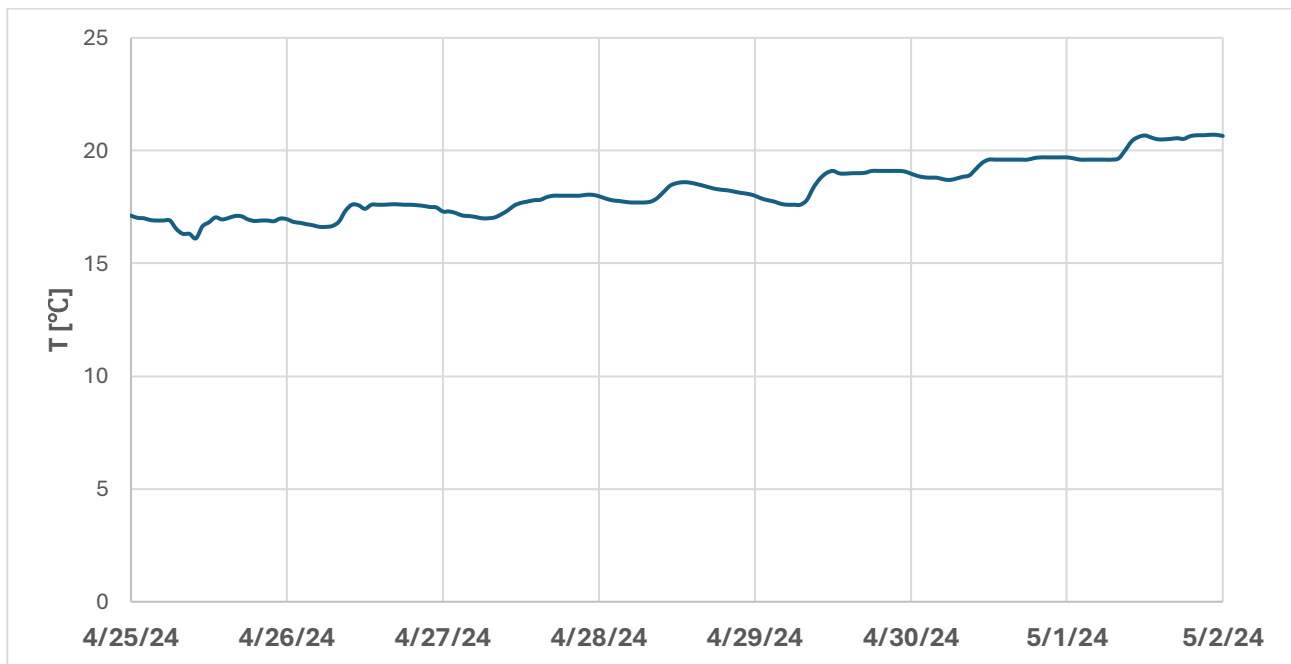


Figura 4.2: distribuzione dei dati settimanali originali di temperatura.

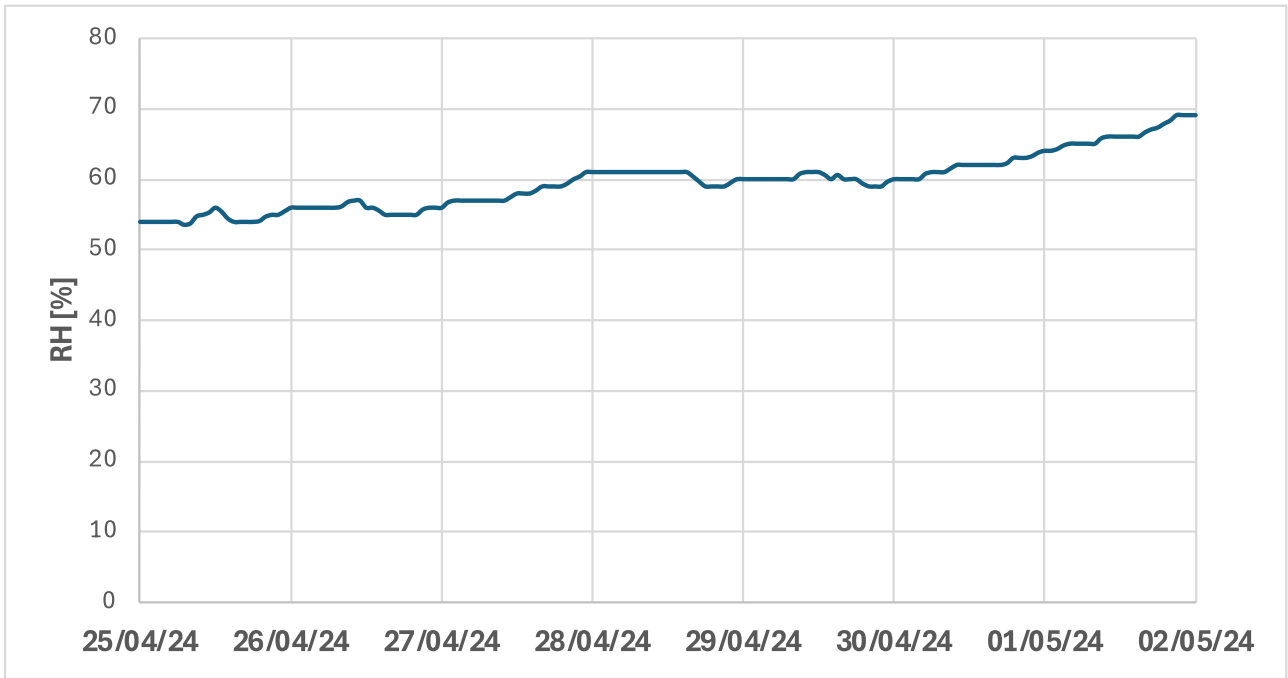


Figura 4.3: distribuzione dei dati settimanali originali di umidità relativa.

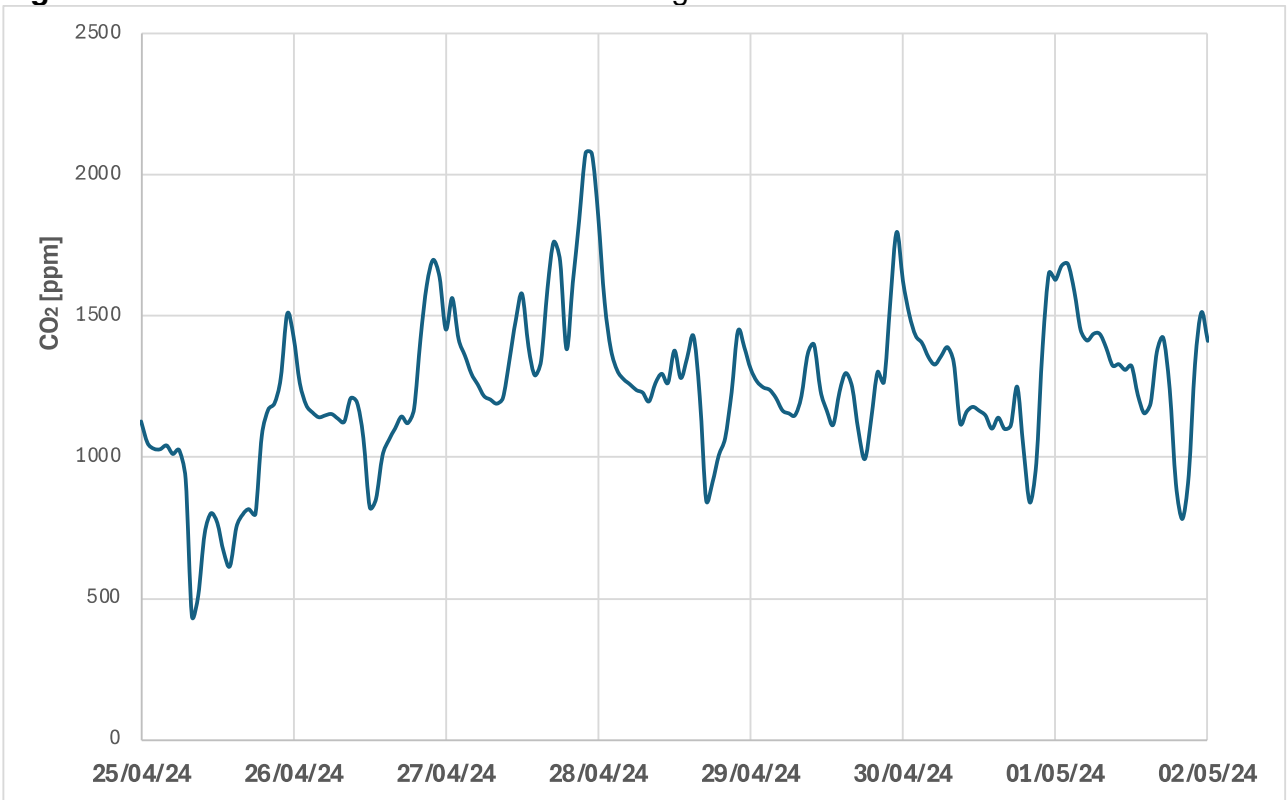


Figura 4.4: distribuzione dei dati settimanali originali di CO₂.

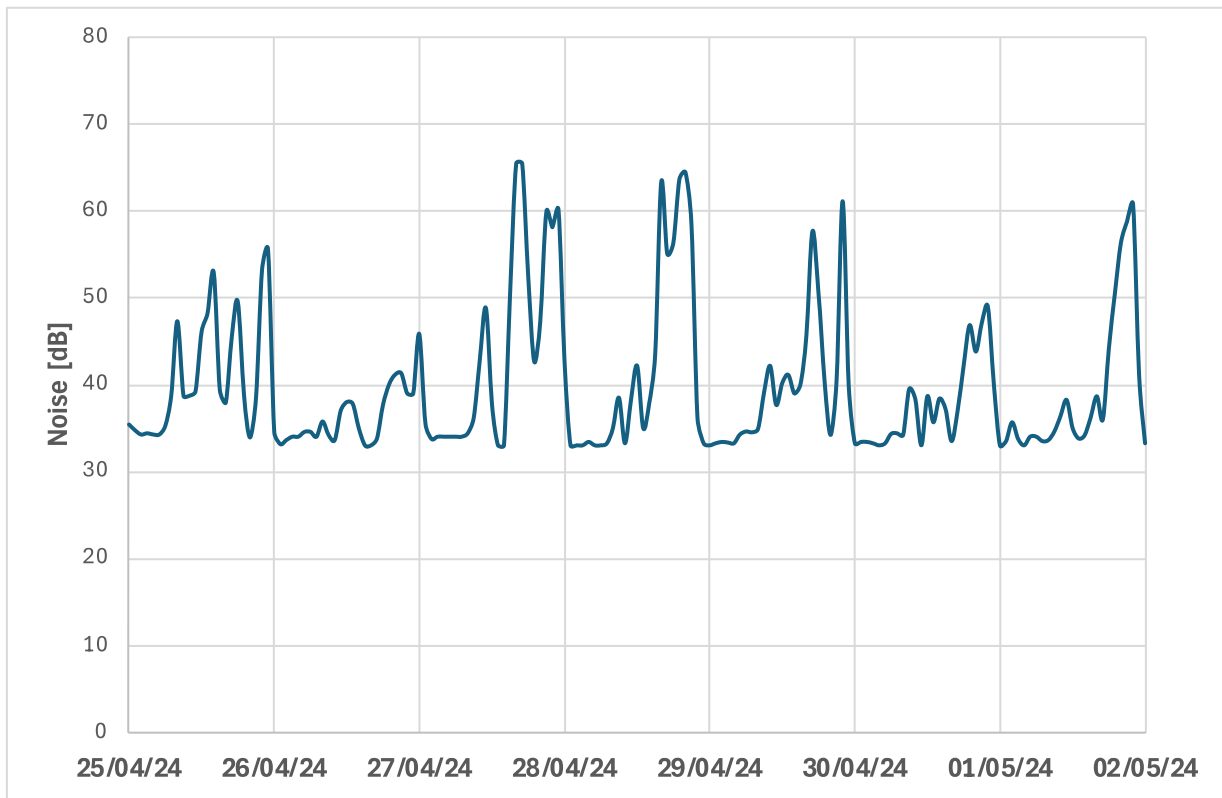


Figura 4.5: distribuzione dei dati settimanali originali di noise.

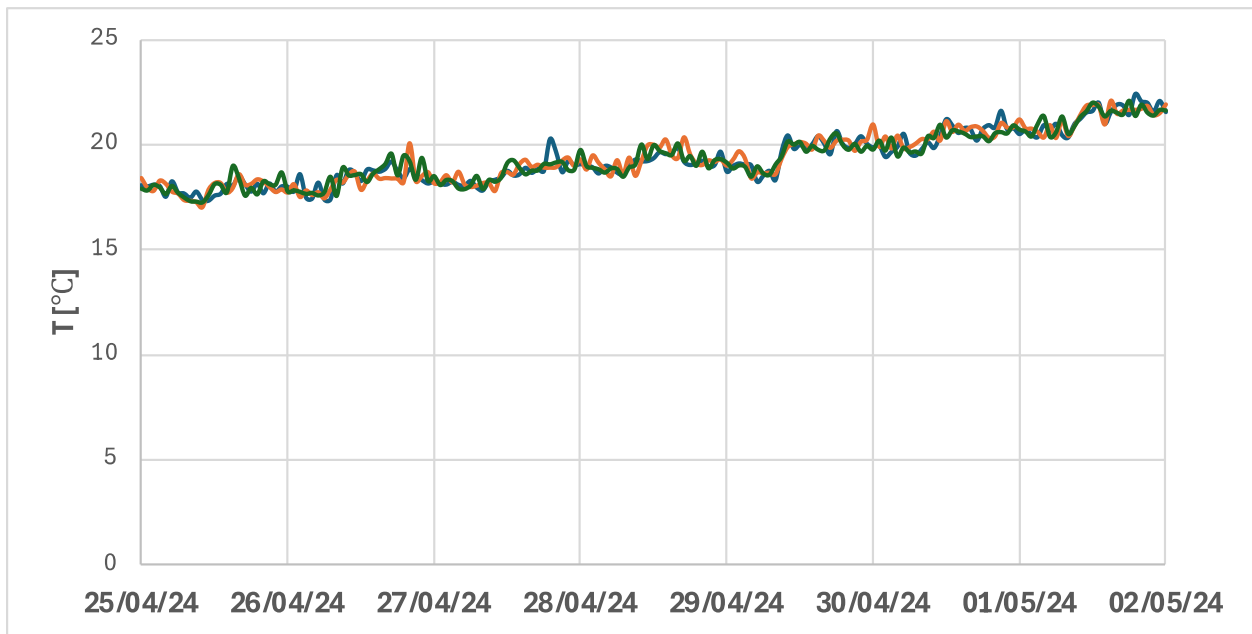


Figura 4.6: tre segnali simulati di temperatura.

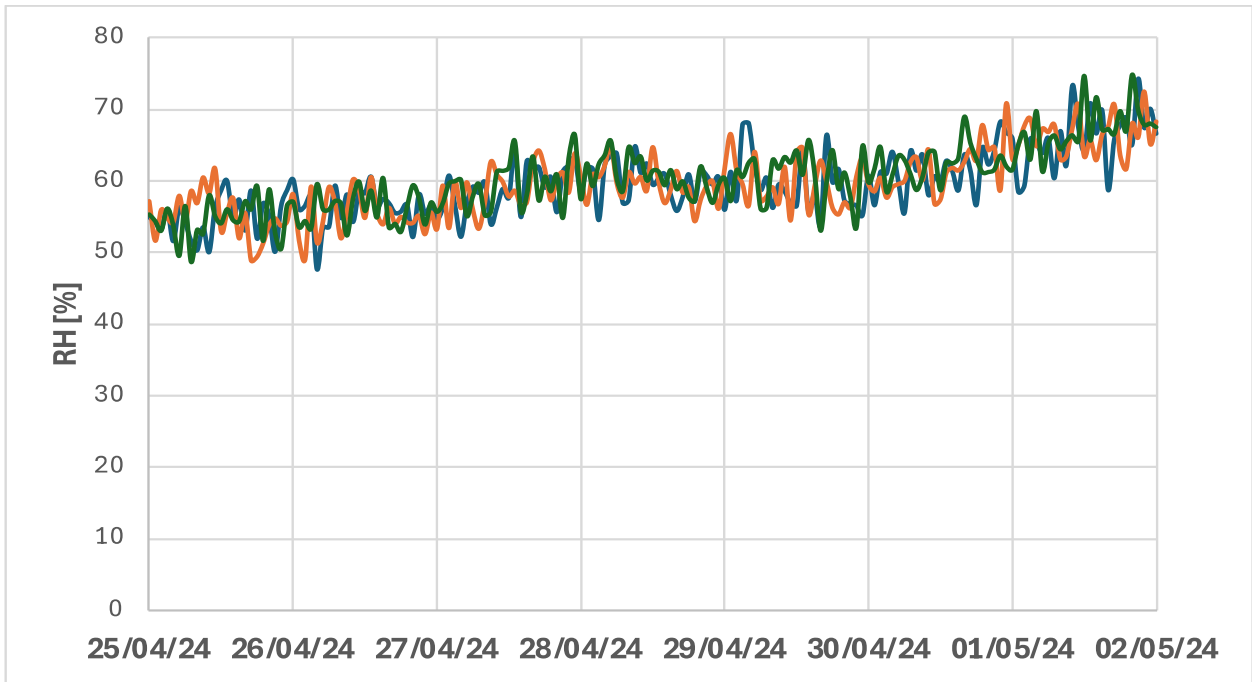


Figura 4.7: tre segnali simulati di umidità relativa.

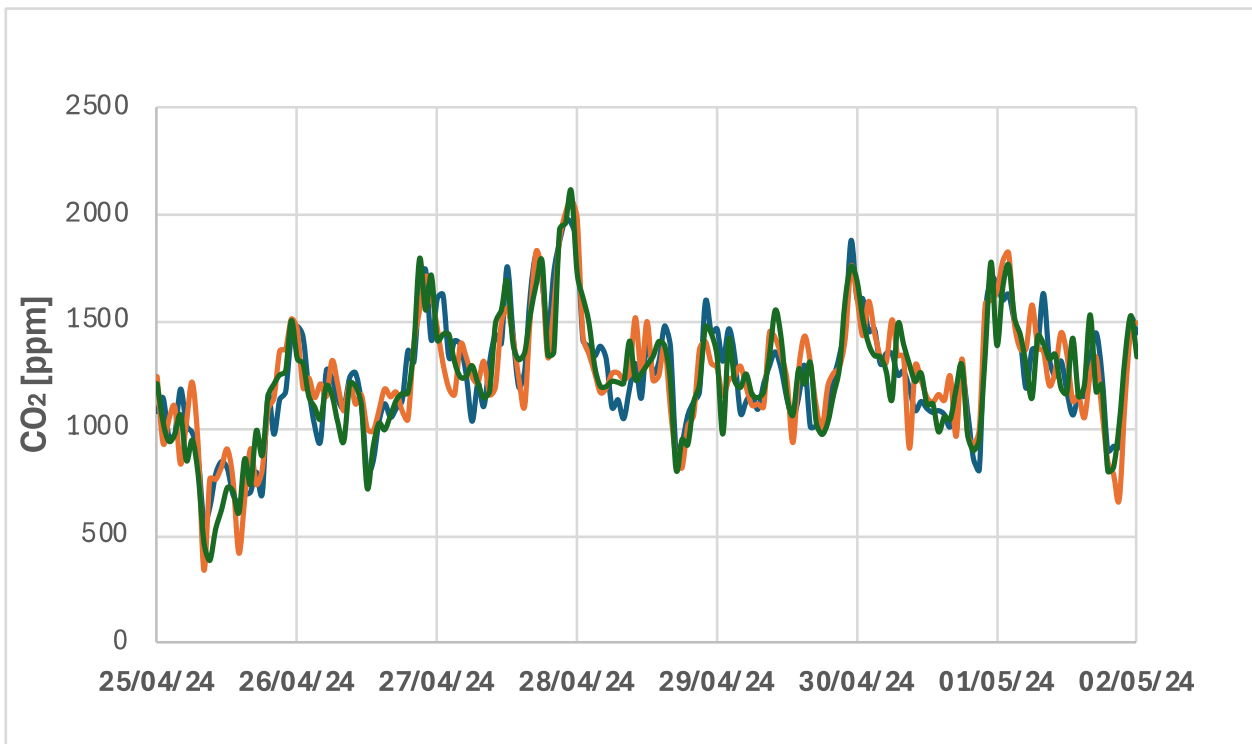


Figura 4.8: tre segnali simulati di CO₂.

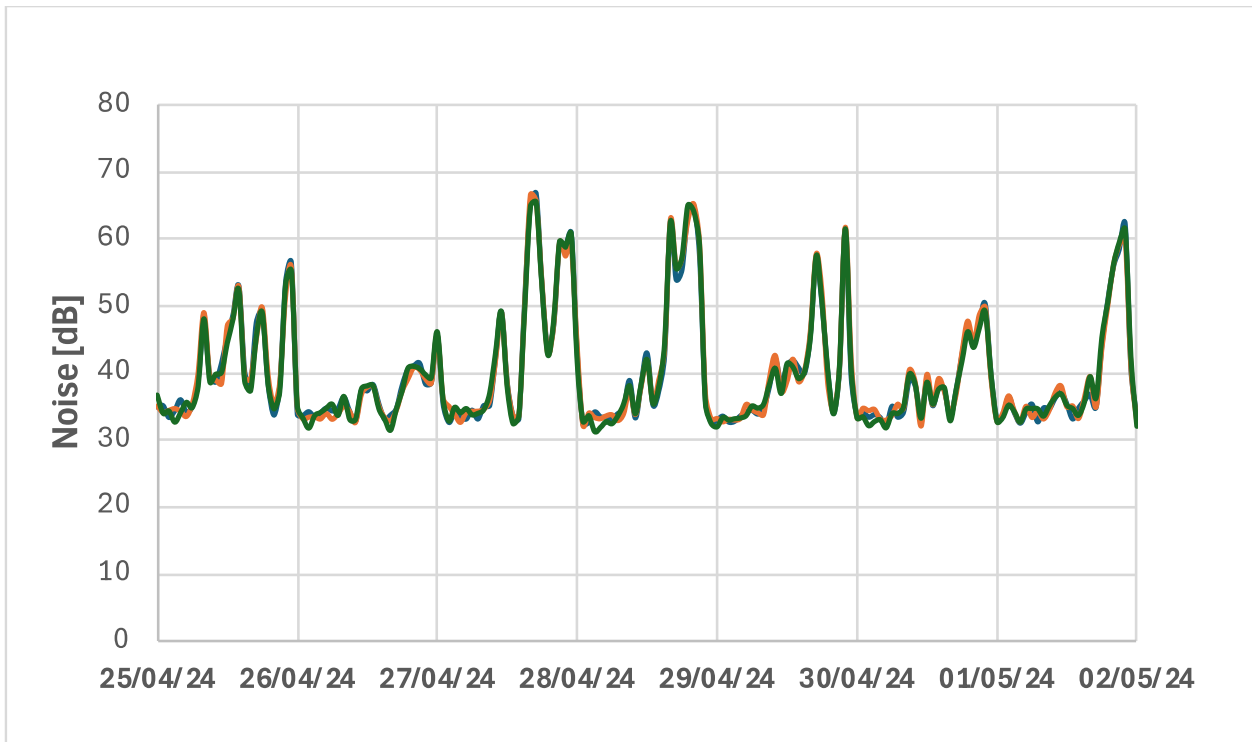


Figura 4.9: tre segnali simulati di noise.

Successivamente si calcolano i KPI's simulati e il relativo IGCI simulato, come riportato in tabella 4.11.

Tabella 4.11: estratto della struttura del dataframe simulato.

KPI.TC [%]	KPI.IAQ [%]	KPI.NOISE [%]	IGCI [%]
75,4	0,0	0,0	27,14
63,6	0,0	0,0	22,90
87,2	0,0	0,0	31,39

Dopo aver realizzato i due dataframe (simulato e riferimento) si calcola l'incertezza del modello come la deviazione standard degli scostamenti tra il valore simulato e quello di riferimento, ottenendo un'incertezza (u_{IGCI}):

$$u_{IGCI} = \pm 4,7 \%$$

Quindi in definitiva si ha un IGCI di 31,32% con un'incertezza di $\pm 4,7 \%$, definendo che per quanto riguarda il comfort non si ha un valore ottimale perché due dei tre KPIs calcolati sono fuori dai range scelti nel periodo analizzato, e pertanto un intervento di efficientamento sarà necessario.

Invece un valore di incertezza di $\pm 4,7 \%$ dimostra un modello accurato, indicatore di un sistema di misurazione robusto, e pertanto si può affermare che l'incertezza del parametro globale dipende solo dalla propagazione delle incertezze dei singoli sensori adoperati.

4.2.2 Analisi di sensibilità

Riprendendo il metodo Saltelli, il coefficiente di sensibilità è calcolato come rapporto tra le varianze nel caso in cui si simula solo la temperatura e si calcola il parametro di output (IGCI) e il caso in cui si simulano tutti i parametri contemporaneamente e si calcola il parametro di output.

A questo proposito si è simulato mediante il metodo Monte Carlo solo la temperatura e si è ricalcolato il IGCI, questo fatto sempre per un numero di iterazione $N = 10\,000$. Per il dataframe in cui tutti i parametri sono stati simulati, si riutilizza il dataframe adoperato per il calcolo dell'incertezza dell'IGCI.

Definito ciò si è calcolato la varianza nel caso di sola temperatura simulata:

$$V_T = \text{var} \begin{bmatrix} (IGCIsim - IGCIrif)1 \\ (IGCIsim - IGCIrif)2 \\ (IGCIsim - IGCIrif)n \end{bmatrix} = 20,26$$

Analogamente per il caso in cui si simula solo l'umidità relativa:

$$V_{RH} = \text{var} \begin{bmatrix} (IGCIsim - IGCIrif)1 \\ (IGCIsim - IGCIrif)2 \\ (IGCIsim - IGCIrif)n \end{bmatrix} = 2,74$$

Analogamente nel caso in cui si simulano tutti i parametri contemporaneamente:

$$V_{TOT} = \text{var} \begin{bmatrix} (IGCIsim - IGCIrif)1 \\ (IGCIsim - IGCIrif)2 \\ (IGCIsim - IGCIrif)n \end{bmatrix} = 22,91$$

Da cui i coefficienti di sensibilità della temperatura (c_T) e della umidità relativa sono:

$$c_T = 0,88$$

$$c_{RH} = 0,12$$

Questi due risultati rendono chiaro quale tra la temperatura e l'umidità relativa ha un impatto maggiore sul calcolo dell'IGCI. Quindi ottenendo un coefficiente di sensibilità per la temperatura dell'88%, significa che nella scelta del sensore di temperatura bisogna sceglierne uno con un'incertezza bassa in quanto il suo impatto è elevato sull'IGCI rispetto alla umidità relativa.

Capitolo 5 – Conclusioni

La seguente tesi affronta in modo diretto lo studio del comfort di due casi specifici in cui è stato realizzato un efficientamento energetico.

I casi in questione sono: il pilot Forum Virium Helsinki (FVH) situato in Finlandia e il pilot Institute for European Energy and Climate Policy (IEECP) situato nei Paesi Bassi; facenti parte di un progetto europeo più ampio chiamato DigiBUILD.

Nella prima parte di questa tesi è stata analizzata la società FVH in cui si sono calcolati i KPI's di qualità dell'ambiente interno, energetici, economici e di impatto ambientale. Nel paragrafo 4.1 sono riportati i risultati ottenendo che per il comfort termico la stanza 134 non rispetta i requisiti imposti dalla normativa; pertanto, un intervento di efficientamento è necessario. D'altro canto, però i KPI's di qualità dell'aria sono ottimali, in quanto la totalità delle stanze si trovano quasi sempre in categoria I o II, e per poche ore del periodo analizzato in categoria di discomfort. Per quanto riguarda invece i KPI's energetici è stata riscontrata una significativa diminuzione della quantità di energia primaria richiesta, tradotta anche in una diminuzione delle spese energetiche da sostenere per la società. Oltre che ad una riduzione delle proprie emissioni di CO₂, rendendo l'edificio maggiormente sostenibile dal punto di vista ambientale.

Nella seconda parte invece è stata analizzata la società IEECP in cui si è voluto calcolare un indice globale (IGCI) che contenesse tutti i parametri disponibili di comfort. Questo per calcolare un unico parametro che permetta di comprendere in modo diretto se l'edificio è in condizioni di comfort o meno durante il periodo analizzato. Questo parametro è espresso in %, dove IGCI = 100% s'intende edificio completamente in comfort e quindi che nel periodo analizzato tutti i suoi parametri sono stati dentro le fasce di comfort definite. Mentre se l'IGCI = 0%, indica che per più del 5% del periodo analizzato, l'edificio è al di fuori dei range di comfort ammessi.

Per comprendere meglio quanto impattasse il sistema di misurazione adoperato nel calcolo dell'IGCI, si è adoperato il metodo Monte Carlo per simulare i vari valori d'input con le proprie incertezze e ottenere l'incertezza del modello come definita dalla GUM. Ciò ha comportato che l'incertezza dell'IGCI è di $\pm 4,7\%$. Quindi in definitiva si ha un IGCI di 31,32% con un'incertezza di $\pm 4,7\%$, ottenendo che per quanto riguarda il comfort non si ha un valore ottimale perché due dei tre KPIs calcolati sono fuori dai range scelti nel periodo analizzato, e pertanto un intervento di efficientamento sarà necessario. Invece un valore d'incertezza di $\pm 4,7\%$ dimostra un modello accurato, indicatore di un sistema di misurazione robusto.

Successivamente mediante un'analisi di sensibilità è stato determinato quale tra temperatura e umidità relativa impattasse maggiormente sul valore di output e il loro peso. Ottenendo un coefficiente di sensibilità per la temperatura dell'88% ed un coefficiente di sensibilità per l'umidità relativa del 12%. Decretando che nella scelta del sensore di temperatura, bisogna sceglierne uno con un'incertezza relativamente bassa, in quanto il suo impatto sull'IGCI è nettamente superiore all'impatto dell'incertezza della umidità relativa.

Una possibile strada da intraprendere nelle future ricerche potrebbe essere quella di far scegliere agli occupanti quanto peso attribuire ad ogni categoria di comfort, in base alle esigenze degli occupanti. Ad esempio, fornendo loro un questionario, in cui rispondendo a determinate domande possano permettere, a chi competente, di estrapolare i pesi iniziali per il modello proposto. Questo in un'ottica di demand-response potrebbe porre le basi ad un modello che permetta di aggiornare i pesi in modo automatico in base alle esigenze e percezione degli utenti finali dell'ambiente in cui si trovano.

Bibliografia

- [1] S. Riffelli, 'A Wireless Indoor Environmental Quality Logger Processing the Indoor Global Comfort Index', *Sensors*, vol. 22, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22072558.
- [2] I. Mujan, A. S. Anđelković, V. Munćan, M. Kljajić, and D. Ružić, 'Influence of indoor environmental quality on human health and productivity - A review', *J Clean Prod*, vol. 217, pp. 646–657, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.307.
- [3] 'Digibuild link'.
- [4] P. Hoppe, 'Comfort Requirements in Indoor Climate', 1988.
- [5] M. Borowski, K. Zwolińska, and M. Czerwiński, 'An Experimental Study of Thermal Comfort and Indoor Air Quality—A Case Study of a Hotel Building', *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15062026.
- [6] R. Barbosa, R. Vicente, and R. Santos, 'Comfort and buildings: climate change vulnerability and strategies', 2016, *Emerald Group Publishing Ltd.* doi: 10.1108/IJCCSM-05-2015-0058.
- [7] 'NORMA 7730'.
- [8] 'UNI EN 15251'.
- [9] 'EN 16798'.
- [10] M. Y. Ho, J. H. K. Lai, H. Hou, and D. Zhang, 'Key performance indicators for evaluation of commercial building retrofits: Shortlisting via an industry survey', *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 21, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14217327.
- [11] 'ISO 12354'.
- [12] 'ISO 12655:2013 - ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS'.
- [13] 'EN ISO 52016-1'.
- [14] R. Hitchin, 'Primary Energy Factors and the primary energy intensity of delivered energy: An overview of possible calculation conventions', Mar. 01, 2019, *SAGE Publications Ltd.* doi: 10.1177/0143624418799716.
- [15] 'UNI EN ISO 13786'.
- [16] 'UNI EN 52003-1'.
- [17] J. Rucinska, A. Komerska, and J. Kwiatkowski, 'Preliminary Study on the GWP Benchmark of Office Buildings in Poland Using the LCA Approach', *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 13, Jul. 2020, doi: 10.3390/en13133298.
- [18] 'UNI EN 7726'.
- [19] C. Buratti, P. Ricciardi, and M. Vergoni, 'HVAC systems testing and check: A simplified model to predict thermal comfort conditions in moderate environments', *Appl Energy*, vol. 104, pp. 117–127, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.015.
- [20] 'Direttiva 2012:27:UE'.
- [21] S. Riffelli, 'Global comfort indices in indoor environments: A survey', Nov. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/su132212784.
- [22] J. Committee for Guides in Metrology, 'First edition 2008 Evaluation of measurement data-Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement"-Propagation of distributions using a Monte Carlo method Évaluation des données de mesure-Supplément 1 du "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure"-Propagation de distributions par une méthode de Monte Carlo', 2008.
- [23] N. Morresi, S. Casaccia, M. Arnesano, and G. M. Revel, 'Impact of the measurement uncertainty on the monitoring of thermal comfort through AI predictive algorithms', *Acta IMEKO*, vol. 10, no. 4, pp. 221–229, 2021, doi: 10.21014/acta_imeko.v10i4.1181.
- [24] S. Serroni, M. Arnesano, M. Martarelli, and G. M. Revel, 'Experimental validation and uncertainty analysis of an innovative IoT infrared sensor for in-situ wall thermal transmittance measurement', *Meas Sci Technol*, vol. 34, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.1088/1361-6501/acf064.

- [25] S. Serroni, M. Arnesano, M. Martarelli, and G. M. Revel, 'Experimental validation and uncertainty analysis of an innovative IoT infrared sensor for in-situ wall thermal transmittance measurement', *Meas Sci Technol*, vol. 34, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.1088/1361-6501/acf064.
- [26] 'UNI 11532'.
- [27] A. Saltelli, M. Ratto, S. Tarantola, and F. Campolongo, 'Sensitivity analysis practices: Strategies for model-based inference', Oct. 2006. doi: 10.1016/j.res.2005.11.014.