



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **INGEGNERIA MECCANICA**

***Comfort ambientale in ambiente costruito: Misure e calcolo con
applicazione della norma UNI EN 16798***

***Environmental comfort in a built environment: Measurements and
calculation with application of the UNI EN 16798 standard***

Relatore: Chiar.mo
Prof. Gian Marco Revel
Correlatore:
Ing. Chiara Crisanti

Tesi di Laurea di:
Gianmarco Rosati

A.A. 2019 / 2020



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **INGEGNERIA MECCANICA**

***Comfort ambientale in ambiente costruito: Misure e calcolo con
applicazione della norma UNI EN 16798***

***Environmental comfort in a built environment: Measurements and
calculation with application of the UNI EN 16798 standard***

Relatore: Chiar.mo

Prof. Gian Marco Revel

Correlatore:

Ing. Chiara Crisanti

Tesi di Laurea di:

Gianmarco Rosati

A.A. 2019 / 2020

Indice

Introduzione -1

Capitolo 1. Teoria del Comfort -2

1.1 Teoria di Fanger -3

1.2 Metodo Adattivo -5

1.3 Norma UNI EN 16798 -6

1.3.1 Comfort Termico nella UNI EN 16798 -7

1.3.2 Qualità dell'aria nella UNI EN 16798 -9

1.3.3 Illuminazione nella UNI EN 16798 -13

1.4 WELL Building Standard -16

1.4.1 Struttura ed Organizzazione della WELL Building Standard -17

Capitolo 2. Sistema di misura: il Comfort Eye -20

Capitolo 3. Aggiornamento ed implementazione del Comfort Module alla UNI EN 16798 -26

3.1 Modulo sul Comfort termico -26

3.1.1 Applicazione del Metodo Predittivo -27

3.1.2 Applicazione del Metodo Adattivo -28

3.1.3 Analisi della Varianza e della Sensibilità -29

3.1.4 Calcolo del KPI -32

3.2 Differenze tra le norme UNI EN 16798 e UNI EN 15251 -33

3.3 Aggiornamento ed Implementazione dello script in Python del Comfort Module -37

1. f_Predictive -37

2. f.Adaptive -38

3. comfort_tool -39

4. KPIcal -40

5. psychroplot e comfort_plot -41

6. thermal comfort script_desk -41

Capitolo 4. Comfort Eye e WELL Standard -44

4.1 Concept AIR -44

4.2 Concept LIGHT -46

4.3 Concept COMFORT -47

4.4 Risultati dello studio dell'applicabilità del Comfort Eye in una Certificazione WELL -48

Conclusioni -49

Bibliografia -50

Ringraziamenti -51

Indice delle Figure

Capitolo 1:

1. Insieme delle variabili che influenzano la percezione di comfort
2. Rappresentazione del bilancio energetico
3. Equazioni di Fanger
4. Scala numerica dei giudizi verso il microclima
5. Relazione analitica tra PPD e PMV
6. Andamento del PPD al variare del PMV
7. Categorie di qualità dell'ambiente interno e rispettivi livelli d'aspettativa
8. Range del PMV e del PPD caratteristici di ogni categoria IEQ
9. Temperatura operativa
10. Media Mobile della temperatura esterna
11. Valori di progetto per la temperatura operativa interna in funzione di Θ_{rm}
12. Equazioni delle rette relative ai valori estremali per ogni categoria IEQ della temperatura operativa
13. Tassi di ventilazione per la diluizione delle emissioni dovute agli occupanti in base alla differenti categorie
14. Tassi di ventilazione per diluire le emissioni in relazione alle differenti categorie di edificio
15. Concentrazione differenziale limite rispetto a quella esterna di anidride carbonica CO_2 , assumendo un'emissione standard pari a 20 [l/h·persona]
16. Tasso di ventilazione predefinito dell'aria per ufficio (nel caso di persone non adattabili)
17. Limiti all'emissione di alcuni inquinanti nelle differenti categorie d'edificio
18. Espressione analitica e schema rappresentativo del concetto di illuminamento
19. Valori minimi di progetto di alcune grandezze illuminotecniche in relazione al tipo di ambiente e all'attività svolta al suo interno
20. Rappresentazione grafica del concetto di fattore di luce diurna
21. Tabella delle Optimizations da soddisfare per raggiungere i vari livelli di certificazione WELL
22. Sistemi ed Apparati del corpo umano
23. Numero di Optimization e Preconditions applicabili in base alla tipologia di progetto
24. Tabella dei punteggi per ogni categoria e Scorecard WELL di un ufficio con certificazione Gold

Capitolo 2:

1. Nodo di misura ad infrarossi del Comfort Eye
2. Relazione di Stefan-Boltzmann per un corpo grigio
3. Coefficiente di remissività
4. Espressione analitica e rappresentazione grafica del concetto di temperatura media radiante
5. Nodo per le misurazioni ambientali del Comfort Eye
6. Nodo per la rilevazione di $PM_{2,5}$ e PM_{10}
7. Funzionamento del sistema d'interfaccia con l'operatore
8. LED a colori per la comunicazione all'utente del livello di qualità dell'aria
9. Grandezze misurate dal Comfort Eye, con relative incertezze

Capitolo 3:

1. Modello in fase di sviluppo dell'interfaccia del modulo sul comfort termico
2. Rappresentazione grafica delle zone di comfort sul diagramma psicrometrico
3. Espressione della temperatura operativa ottimale
4. Relazione che lega la media mobile alla temperatura media giornaliera dell'ambiente esterno

5. Zona di comfort secondo la EN 15251 utilizzando il metodo Adattivo e rappresentazione della condizione operativa dell'edificio
6. Schema rappresentativo del metodo Monte Carlo
7. Rappresentazione grafica della varianza del PMV, calcolata attraverso l'analisi della varianza
8. Rappresentazione grafica della varianza della temperatura operativa
9. Esempio del risultato di un'analisi di sensibilità impiegando distintamente il modello adattivo e predittivo
10. Rappresentazione grafica del KPI calcolato dal Comfort Module
11. Rappresentazione della differenza tra i range del PMV delle categorie di comfort relativi alle due diverse norme
12. Range del PPD per le categorie di comfort relative alla due differenti norme
13. Limiti per la temperatura operativa in ambienti con sistemi meccanici di climatizzazione
14. Incremento di temperatura (operativa) in relazione alla velocità dell'aria
15. Limiti superiori ed inferiori per la temperatura operativa di categorie di comfort differenti relativa a norme nazionali ed internazionali diverse
16. Range del PPD per le categorie di comfort in relazione alla qualità dell'aria
17. Definizione di low e very low polluting building nelle due norme
18. Valori di progetto differenti tra le due norme in riferimento al metodo della qualità dell'aria percepita
19. Range di CO₂ relativi alle varie categorie di comfort per le due norme
20. Aggiunta della categoria 4 e modifica della denominazione della categorie coerentemente con la UNI EN 16798 (prima si faceva riferimento alla ISO 7730)
21. Modifica della funzione $f_{Adaptive}$
22. Modifica della parte relativa al modello adattivo della funzione $thermal_tool$
23. Modifica della parte relativa al modello predittivo della $thermal_tool$
24. Implementazione della funzione KPI_{cal}
25. Confronto tra la rappresentazione delle zone di comfort sul diagramma psicrometrico prima e dopo l'aggiornamento
26. Confronto tra la rappresentazione delle zone di comfort nel metodo adattivo nelle due differenti norme
27. Rappresentazione della percentuale di tempo in una determinata categoria includendo l' "OUT OF CATEGORY"

Introduzione

Numerosi studi hanno dimostrato come in generale passiamo circa il 90% del nostro tempo all'interno di spazi chiusi e come questi ultimi possano influenzare fortemente la salute, il benessere e la produttività di un individuo. Quanto appena detto ci fa capire che il concetto di Comfort ha un riflesso economico non indifferente, difatti si stima che negli anni a venire quello del Comfort Indoor diventerà un settore d'investimento da miliardi di euro. Tuttavia il concetto di Comfort non ha radici molto lontane. Le prime teorie sul Comfort nascono solo nella seconda metà del XX secolo, dove il contributo maggiore fu quello dato dalla teoria sviluppata negli anni settanta dal Professor P.O.Fanger, il quale per primo riuscì a formulare tramite un approccio puramente sperimentale una teoria razionale che si basasse su un "semplice" bilancio energetico applicato al corpo umano. Negli anni successivi, a partire dai risultati raggiunti dal Fanger, gli studi in quest'ambito si sono fatti sempre più insistenti poiché si evidenziò che molto spesso elevate prestazioni energetiche di un edificio ed il benessere degli occupanti rappresentano le due facce di una stessa medaglia. Questa trattazione pertanto si svilupperà inizialmente attraverso una panoramica sullo stato dell'arte di questa materia, per poi concentrarsi nello specifico sulle nuove frontiere del comfort indoor. Partiremo dalla teoria predittiva di Fanger per passare poi al modello adattivo. Parleremo perciò della UNI EN 16798 che rappresenta la norma di riferimento per il benessere di un individuo in edifici con sistemi meccanici di raffreddamento e riscaldamento, entrata in vigore nel giugno dello scorso anno sostituendo la UNI EN 15251. Analizzeremo poi l'approccio innovativo dato dalla certificazione WELL al problema del Comfort Indoor. Infine in ambito prettamente metrologico, ci occuperemo di analizzare il Comfort Eye ovvero l'innovativo sensore sviluppato e brevettato dal laboratorio di misure dell'Università Politecnica delle Marche, impiegato nel contesto della valutazione del comfort in ambienti confinati e delle prestazioni energetiche di un edificio. Una volta analizzati tutti questi aspetti teorici, introdurremo il Comfort Module ovvero un programma scritto in linguaggio Python il cui scopo è quello di effettuare un'analisi della prestazione energetica di un edificio e della rispondenza delle sue condizioni operative alla normativa di riferimento riguardante il comfort. Il nostro compito è stato quello di aggiornare ed implementare adeguatamente tale script in funzione della nuova norma ora in vigore ovvero la UNI EN 16798, dal momento che questo faceva ancora riferimento alla UNI EN 15251. Una volta fatto ciò, ci siamo chiesti anche se e come un sensore come il Comfort Eye potesse essere impiegato nel contesto di una certificazione di tipo WELL. Ci siamo premurati perciò di individuare quanto prescritto nel testo dello Standard WELL, effettuando così uno studio, i cui risultati verranno mostrati in seguito, sull'applicabilità del sensore Comfort Eye a questo Standard innovativo.

Capitolo 1. Teoria del Comfort

Prima di entrare nel vivo della trattazione, facciamo una piccola digressione sull'evoluzione della teoria del comfort ambientale. Quando parliamo di "Comfort Ambientale", la letteratura scientifica ci fornisce numerose definizioni:

- in accordo con la UNI EN ISO 7730: "condizione che esprime la soddisfazione con l'ambiente termico circostante, mentre l'eventuale insoddisfazione può essere causata dal disagio (discomfort) del corpo umano nel suo insieme in relazione al caldo o al freddo, [...] o dal raffreddamento (o riscaldamento) di una particolare parte del corpo";
- in accordo con la ASHRAE 55-2004: "Il comfort termico è la condizione che esprime la soddisfazione con l'ambiente termico circostante ed è stimato da una valutazione soggettiva".

Quindi capiamo che definire univocamente il comfort, anche se le varie definizioni possano sembrare tra di loro simili, non è semplice. Il perché di ciò risiede nel fatto che il Comfort di per sé è di difficile trattazione dal momento che tale sensazione dipende da un elevato numero di fattori distinti. Le variabili che influenzano la valutazione del comfort possono essere di tipo ambientale o personale. Una rappresentazione di queste variabili è data nella Figura 1.

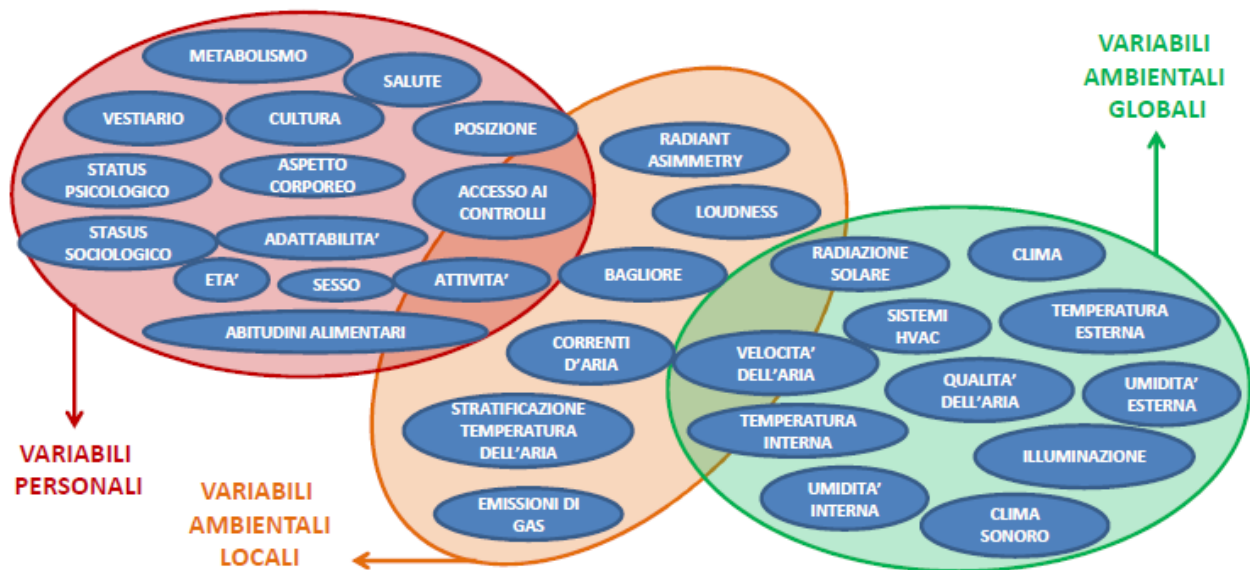


Figura 1.1: Insieme delle variabili che influenzano la percezione di comfort

È evidente perciò come tale sensazione coinvolga tutta la sfera sensoriale, infatti si è soliti dividerne lo studio in:

- comfort termoigrometrico: personale soddisfazione verso il microclima in relazione ai livelli di temperatura e di umidità;
- comfort visivo: personale soddisfazione in termini di illuminazione naturale, eventuale abbigliamento e resa cromatica;
- comfort acustico: personale soddisfazione in termini di rumore ed al campo sonoro;

- qualità dell'aria interna (comfort olfattivo): personale soddisfazione in termini di CO₂, composti organici volatili (VOC), polveri, virus e batteri contenuti nell'aria.

La teoria del comfort, sviluppatasi dalla seconda metà del ventesimo secolo, ha cercato e cerca tutt'ora un metodo che permetta a priori, in relazione ai parametri ambientali misurati, di determinare se, in uno specifico ambiente, uno specifico individuo possa trovarsi in una condizione di comfort o meno. Il primo passo in questa direzione è stato fatto con la teoria sviluppata da Fanger.

1.1 Teoria di Fanger

Intorno agli anni settanta, Fanger mise a punto un primo modello di comfort che si basasse su di un bilancio energetico e che pertanto prende in considerazione solo il comfort termoigrometrico. L'ipotesi di base di questa teoria è che il comfort (termoigrometrico) ha ragione di essere garantito solo in ambienti termici moderati, dove per ambienti termici moderati intendiamo un qualsiasi ambiente che soddisfa le seguenti condizioni: fattori ambientali omogenei, scambi termici uomo-ambiente contenuti, livello di attività fisica basso e omogeneo tra gli utenti, uniformità nel vestiario e nessuna necessità specifica di fissare o limitare uno (o più) parametri ambientali. Invece in tutti gli altri casi in cui si ha un ambiente cosiddetto "severo" (caldo o freddo) la teoria di Fanger sostiene che al massimo possiamo garantire la minimizzazione dello stress termico.

La portata rivoluzionaria del modello di Fanger sta però nel fatto che, per tradurre il concetto di comfort in forma ingegneristica, il corpo umano viene visto come un sistema termodinamico che converte il cibo, come se fosse un combustibile, in lavoro e calore in analogia con una generica macchina termica inanimata. L'eventuale surplus energetico non convertito in lavoro viene disperso in ambiente mediante meccanismi di perdita di calore sensibile (perdita radiante verso superfici più fredde, per convezione verso l'aria più fredda o di calore per respirazione) e latente (perdita di calore latente per respirazione, diffusione di vapore attraverso la pelle o sudorazione).

Il set-up sperimentale utilizzato da Fanger era costituito da 1300 soggetti posti all'interno di una camera controllata. Il suo obiettivo era quello di determinare la temperatura ambientale ideale per ogni set di parametri ambientali, fisiologici e legati al soggetto, in modo da ricavare un sistema di equazioni che caso per caso permettesse di prevedere la sensazione provata dagli occupanti. Il risultato sono le cosiddette "Equazioni di Fanger":

$$M - W = M(1 - \eta) = \frac{T_{sk} - T_{op}}{0,155 \cdot I_{cl} + \frac{1}{f_{cl} h}} + 3,05 \cdot 10^{-3} (256 \cdot T_{sk} - 3373 - \phi \cdot p_{as}) + E_{sw} + M \left[(0,101 - 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot \phi \cdot p_{as}) + 0,0014 \cdot (34 - T_a) \right]$$

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

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

Figura 1.3: Equazioni di Fanger

Tali equazioni rappresentano un sistema di tre equazioni con 6 variabili indipendenti: 4 ambientali (temperatura media radiante, temperatura, velocità ed umidità dell'aria) e 2 legate al soggetto (attività metabolica ed abbigliamento). In realtà le variabili sarebbero 8 poiché ve ne sono 2 fisiologiche (temperatura della pelle e potenza termica dispersa per sudorazione); queste però sono dipendenti dalle altre sei attraverso una relazione analitica anche piuttosto complessa. Verrebbe da chiedersi a questo punto quali siano le condizioni che queste equazioni rappresentano. La prima equazione nello specifico

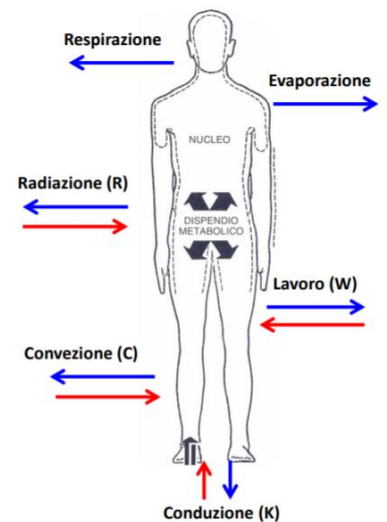


Figura 1.2: Rappresentazione del bilancio energetico

rappresenta il bilancio termico del corpo umano in condizioni di omeotermia (temperatura interna T_{body} costante); il soggetto si trova pertanto in una condizione di neutralità termica. Per neutralità termica intendiamo quella particolare condizione tale per cui il soggetto occupante non lamenta una sensazione né di caldo né di freddo all'interno di quello specifico ambiente. La seconda equazione rappresenta la percentuale accettabile di sudorazione rispetto ai limiti imposti dal comfort. Tale equazione ci permette di capire che in caso di attività sedentaria la sudorazione è sgradita, al contrario durante un'attività motoria una certa dose di sudorazione risulta gradita, se non addirittura necessaria. L'ultima delle tre equazioni descrive la temperatura media della pelle, la quale deve essere più bassa in caso di attività motoria. In definitiva, Fanger afferma attraverso i suoi studi che l'insieme delle possibili condizioni di comfort potesse essere ottenuto attraverso una qualsiasi combinazione delle sei variabili indipendenti che soddisfacesse le 3 equazioni del comfort.

I contributi dati da Fanger allo studio del comfort ambientale però non finiscono qui. Un ulteriore output della sua attività sperimentale, adottato nella UNI EN ISO 7730 dal 1984, è il PMV "Predicted Mean Vote". Questo è un indice razionale che consente di prevedere il voto medio previsto espresso dagli occupanti un dato ambiente, potendo supporre di chiedere a ciascuno di formulare un giudizio sulla sensazione nei riguardi del microclima. Tale giudizio si basa su una scala numerica a 7 punti di questo tipo:

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

Figura 1.4: Scala numerica dei giudizi verso il microclima

Congiuntamente con il PMV, Fanger sviluppò un secondo indice che considerando l'approccio statistico implicito nella definizione del PMV, esprimesse la percentuale di insoddisfatti. Questo indice prende il nome di PPD "Percentage of Person Dissatisfied". Entrambi questi indici vengono determinati attraverso un algoritmo, formulato in base all'analisi di regressione dei dati raccolti e descritto nella UNI EN ISO 7730, il quale ci permette di capire come fondamentalmente il PPD sia strettamente dipendente dal PMV.

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

Figura 1.5: Relazione analitica tra PPD e PMV

Risulta evidente dalla relazione in figura 5 che il valore del PPD, nel caso in cui il PMV sia nullo, è pari al 5%. Questo perché il PMV rappresenta il voto medio di un certo campione di occupanti caratterizzato però da una certa dispersione attorno al valor medio, pertanto è impensabile poter individuare condizioni ambientali che siano confortevoli per tutti gli occupanti, come mostrato dall'andamento del PPD al variare del PMV.

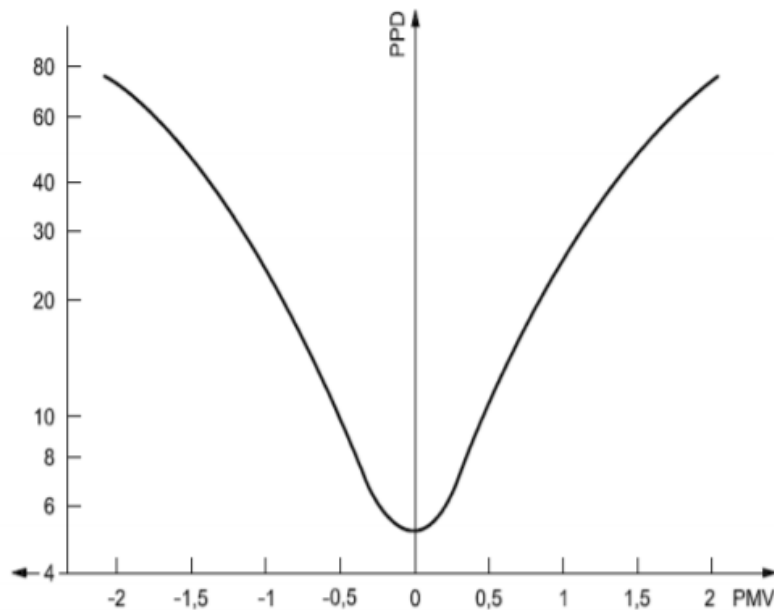


Figura 1.6: Andamento del PPD al variare del PMV

Tuttavia, benché l'utilizzo di questi indici presenti una serie di innegabili vantaggi (approccio relativamente semplice e tecnicamente corretto che è riuscito a stabilire temperature di comfort anche negli edifici con sistemi HVAC), il loro impiego comporta anche dei contro non indifferenti. Difatti con questo metodo sottostimiamo notevolmente la tolleranza termica delle persone il che porta ad un consumo esagerato di combustibile per la climatizzazione indoor. In più tra le ipotesi di questa trattazione ci sono l'uniformità del vestiario e dell'attività metabolica da parte degli occupanti, ipotesi che risultano molto spesso non rispettate (ad eccezione di ambienti di lavoro particolari, caratterizzati da divise funzionali). Il più macroscopico difetto di questo metodo è che questo non considera minimamente una serie di complessità presenti nella realtà quotidiana come le differenti culture degli occupanti, i diversi climi in cui tale teoria può essere applicata ma soprattutto il possibile adattamento e controllo dell'ambiente da parte degli occupanti. Per cui la ricerca in questo campo cominciò, dai primi anni Ottanta fino all'inizio del nuovo millennio, ad esplorare metodi alternativi che riesaminassero la teoria del comfort termico convenzionale e che si focalizzassero anche sulla qualità dell'aria interna.

1.2 Metodo Adattivo

Gli studi, effettuati in campo mondiale dopo le ricerche di Fanger, rilevarono in primis che vi era una certa correlazione tra temperatura interna ideale per il raggiungimento del comfort e la temperatura esterna; in secondo luogo si notò che in linea di massima gli utenti di un edificio dotato di ventilazione naturale avevano una maggiore capacità di acclimatazione rispetto ad uno stesso utente in un edificio climatizzato. Con queste basi venne introdotto un nuovo modello denominato "adattivo", la cui ipotesi principale è che gli utenti di un dato ambiente termico interagiscano attivamente con quest'ultimo applicando delle misure di acclimatazione e controllo al fine di mantenere e/o ripristinare il loro soddisfacimento nei confronti dell'ambiente interno. Pertanto, tale modello considera gli occupanti non più come dei soggetti passivi, bensì come dei soggetti attivi capaci di adattarsi termicamente attraverso tre specifiche modalità di adattamento:

- *adattamento comportamentale*: alcune delle possibili strategie adattive di questo tipo possono essere l'utilizzo di ventilatori e di finestre per la ventilazione, modifiche nel vestiario o consumo di

cibo o bevande; tali azioni possono poi suddividersi in consapevoli, inconsapevoli, personali, tecnologiche o culturali;

- *adattamento fisiologico*: il sistema di termoregolazione del corpo umano attua una serie di strategie per acclimatarsi come la vasocostrizione o la vasodilatazione rispettivamente se si riduce o aumenta la temperatura della pelle; talvolta in climi estremi gli adattamenti a lungo termine possono diventare permanenti (adattamento genetico);
- *adattamento psicologico*: corrisponde all'alterazione spontanea della reazione e della percezione termica in relazione ad esperienze passate ed eventuali aspettative.

Questo metodo viene applicato da moltissimi enti di normazione nazionali ed internazionali come l'ASHRAE (Stati Uniti d'America), l'ACA (Europa), il CEN (Europa), l'ATL (Paesi Bassi). Il modello adattivo dovrebbe essere preferito al metodo che usa gli indici PMV e PPD, chiamato anche Predittivo, ogni qualvolta gli occupanti abbiano accesso ai sistemi di controllo ambientale (regime dinamico) o siano impegnati in attività sedentarie con tasso metabolico di 1-1.3 met (met è un'unità di misura dell'attività metabolica) e con una temperatura media dell'ambiente compresa tra i 10°C ed i 33.5°C.

1.3 Norma UNI EN 16798

L'Ente Nazionale Italiano di Unificazione UNI nel 2019 ha reso pubblica la UNI EN 16798 dal titolo "Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici" divisa poi in una serie di parti. Questa norma va a sostituire la UNI EN 15251 "Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica". La UNI EN 16798 si inserisce all'interno di un set di norme definite EPB Standards (Energy Performance of Buildings Standards) il cui obiettivo è quello di uniformare le metodologie per la valutazione della prestazione energetica degli edifici. Questa in particolare fornisce metodi e dati di input richiesti per la valutazione della prestazione energetica dell'edificio, facendo riferimento anche ad altre norme EPB, grazie anche all'introduzione di modelli in corrispondenza delle appendici (Annex). Parliamo di questa norma perché, come la UNI EN 15251, utilizza come modello di valutazione del comfort termico, congiuntamente a quello predittivo, quello adattivo.

Andando più nello specifico, vediamo che tale norma risulta valida quando i criteri per l'ambiente interno sono regolati dall'occupazione umana e dove la produzione o i processi produttivi non hanno un impatto significativo sull'ambiente interno. In generale il mantenimento di una certa qualità dell'ambiente interno IEQ (Indoor Environmental Quality) comporta un determinato fabbisogno energetico che a sua volta dipende da un insieme di fattori quali: il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione e l'illuminazione. Numerosi studi hanno ampiamente dimostrato che la qualità dell'ambiente interno influenza sensibilmente la salute, la produttività ed il comfort degli occupanti. Una buona qualità dell'ambiente interno ha un effetto positivo, oltre che sulla produttività degli occupanti, anche sull'apprendimento da parte dei nuovi assunti, realizzando perciò una riduzione dell'assenteismo. Al contrario una bassa qualità dell'ambiente interno incide pesantemente sul costo dell'energia oltre che sul benessere percepito dagli utenti. Questi infatti saranno portati a compiere azioni che possano migliorare la propria situazione in termini di comfort, ma tali azioni molto spesso producono complicazioni dal punto di vista energetico (vedi ad esempio aprire le finestre o modificare la temperatura interna).

La qualità dell'ambiente interno inoltre dipende da fattori di discomfort locale, quali correnti d'aria, asimmetria della temperatura radiante, gradienti di temperatura verticale (tra il livello della testa e quello delle caviglie) e la temperatura superficiale del pavimento. La norma definisce i limiti dei fattori di discomfort per cui si è ancora possibile raggiungere una buona qualità dell'ambiente interno.

Tale norma distingue i vari ambienti in categorie a seconda del loro livello di qualità in relazione al comfort degli occupanti. Di seguito riportiamo una tabella con le varie categorie e di fianco il livello d'aspettativa da parte degli utenti.

Categoria	Livello di aspettativa
IEQ _I	Alto
IEQ _{II}	Medio
IEQ _{III}	Moderato
IEQ _{IV}	Basso

Figura 1.7: Categorie di qualità dell'ambiente interno e rispettivi livelli d'aspettativa

Nella pratica una categoria di tipo 2 con livello d'aspettativa medio corrisponde ad un livello di qualità normale, pertanto si progetta in categoria 1 se l'ambiente dovesse venire occupato da soggetti con particolari necessità o comunque che siano particolarmente sensibili come bambini, anziani o disabili. La categoria 4 in cui ho il livello minimo di aspettativa non comporta necessariamente rischi per la salute dell'occupante, tuttavia siamo sicuri che un soggetto al suo interno non si troverà in una condizione di comfort.

1.3.1 Comfort termico nella UNI EN 16798

La norma presa in esame tratta separatamente i vari fattori che concorrono alla realizzazione del comfort indoor come la qualità dell'aria interna, l'ambiente termico o l'illuminazione. Cominciamo parlando del comfort di tipo termico. Come abbiamo già avuto modo di vedere nella relazione di Fanger, il benessere termoigrometrico provato da un individuo inserito all'interno di un ambiente, dipende dai valori assunti da certe grandezze:

- temperatura dell'aria;
- temperatura media radiante;
- umidità relativa;
- velocità dell'aria;
- attività metabolica (met);
- isolamento dato dall'abbigliamento (clo).

La presente norma utilizza un metodo d'approccio diverso per la valutazione del comfort termico in un ambiente a seconda che questo sia posto in un "edificio con sistema di ventilazione meccanica" o in un "edificio senza sistema di ventilazione meccanica".

Vediamo pertanto il primo caso ovvero quello di un edificio dotato di impianto di ventilazione meccanica per il riscaldamento o il raffrescamento degli ambienti. La norma descrive come, nel caso di edificio con ventilazione meccanica, l'approccio da utilizzare sia quello predittivo il quale si basa, come sappiamo, sugli indici di comfort termico PMV e PPD. La UNI EN 16798 prescrive quindi per ogni categoria IEQ dei limiti specifici ai valori assumibili dal PMV e dal PPD (Figura 8).

Categoria	Stato termico del corpo nel suo insieme	
	Predicted Percentage of Dissatisfied PPD [%]	Predicted Mean Vote PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	< 25	-1,0 < PMV < +1,0

Figura 1.8: Range del PMV e del PPD caratteristici di ogni categoria IEQ

È evidente che a ciascuna categoria corrispondono valori del PMV e del PPD sempre meno restrittivi man mano che passiamo dalla categoria 1 a quelle inferiori. Dunque come abbiamo anticipato prima, la categoria 1 presenta valori abbastanza stringenti degli indici in previsione di un'utenza con particolari esigenze (bambini, anziani, disabili) al fine di garantire un maggiore benessere termoisometrico. Al contrario la categoria 4, pur non prevedendo rischi per la salute degli occupanti, non garantisce il comfort termico visto il range abbastanza largo del PMV e, consequenzialmente, del PPD.

Nel caso di un edificio sprovvisto di ventilazione meccanica, il metodo adottato dalla EN 16798 è quello adattivo. La norma fa riferimento per la trattazione del comfort indoor in ambienti di questo tipo, alla temperatura operativa. Questa fondamentalmente corrisponde ad una temperatura media pesata tra la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria dove i coefficienti di peso corrispondono ai coefficienti di scambio termico convettivo e radiativo. Tuttavia in ambienti termici moderati, in cui il valore assoluto della differenza tra la temperatura media radiante e quella dell'aria ambiente è minore di 4 gradi, la temperatura operativa può essere valutata semplicemente come la media aritmetica delle due temperature.

$$T_{op} = \frac{h_r T_r + h_c T_a}{h_r + h_c}$$

Figura 1.9: Temperatura operativa

La norma specifica che per rimanere in una determinata categoria IEQ, l'ambiente preso in considerazione deve trovarsi ad una temperatura operativa compresa in un certo intervallo. Le temperature operative massime e minime per ogni categoria vengono espresse in funzione della media mobile della temperatura esterna (running mean). La media mobile della temperatura esterna, a sua volta, viene ricavata da una relazione approssimata fornitaci della norma che esprime la Θ_{rm} in funzione delle temperature medie giornaliere dei giorni precedenti:

$$\Theta_{rm} = (\Theta_{ed-1} + 0,8 \Theta_{ed-2} + 0,6 \Theta_{ed-3} + 0,5 \Theta_{ed-4} + 0,4 \Theta_{ed-5} + 0,3 \Theta_{ed-6} + 0,2 \Theta_{ed-7})/3,8$$

Figura 1.10: Media Mobile della temperatura esterna

Per cui la norma ci fornisce i valori limite (estremo superiore ed inferiore) della temperatura operativa in funzione della media mobile. Pertanto riportiamo la rappresentazione delle rette che delimitano ogni categoria e le loro equazioni le quali si applicano solo in un range di Θ_{rm} compreso tra 10 e 30°C.

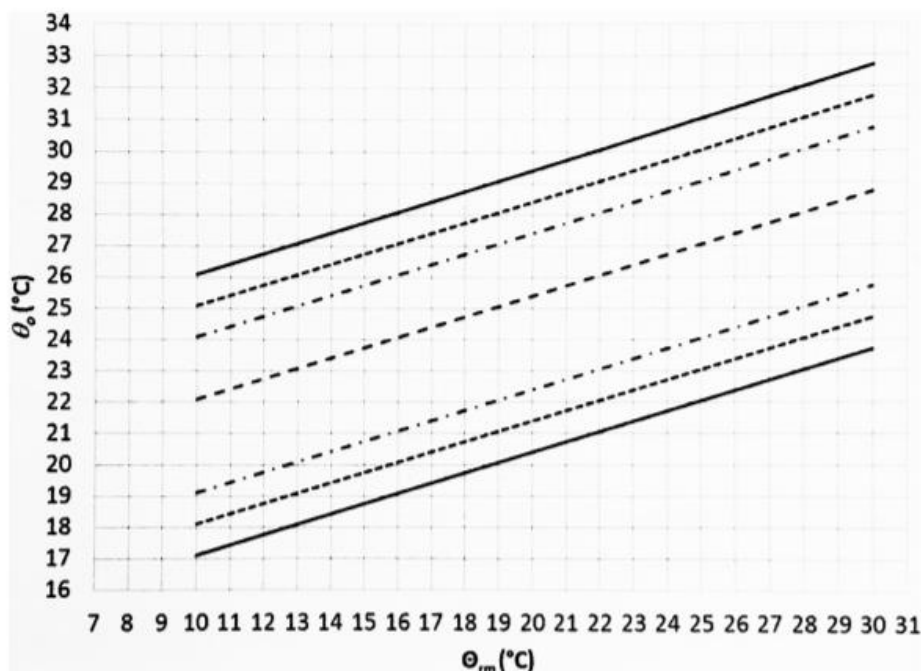


Figura 1.11: Valori di progetto per la temperatura operativa interna in funzione di Θ_{rm}

Categoria I	limite superiore	$\theta_o = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 + 2$
	limite inferiore	$\theta_o = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 - 3$
Categoria II	limite superiore	$\theta_o = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 + 3$
	limite inferiore	$\theta_o = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 - 4$
Categoria III	limite superiore	$\theta_o = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 + 4$
	limite inferiore	$\theta_o = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 - 5$

Figura 12: Equazioni delle rette relative ai valori estremali per ogni categoria IEQ della temperatura operativa

1.3.2 Qualità dell'aria nella UNI EN 16798

La qualità dell'aria interna (Indoor Air Quality o IAQ) si riferisce all'aria respirata negli ambienti confinati quali abitazioni, uffici, strutture destinate ad attività ricreative o sociali o anche mezzi di trasporto pubblici (treni, navi, aerei). In generale l'aria presente all'interno di ambienti chiusi proviene comunque dall'esterno attraverso sistemi di ventilazione naturale o meccanica. Si ricorre alla ventilazione meccanica di norma quando quella naturale non è sufficiente a garantire un adeguato livello di salubrità dell'aria presente all'interno dell'ambiente interno. La qualità dell'aria dipende in parte anche dalle caratteristiche dell'involucro edilizio ed in parte da altri fattori come il tipo di attività svolta ed il numero di occupanti. Quest'ultimo fattore è di forte rilevanza perché, in ambienti chiusi o semi-chiusi, l'ossigeno presente nell'aria viene gradualmente consumato mediante i naturali processi di respirazione e traspirazione del corpo umano. Pertanto l'ossigeno viene ad essere sostituito attraverso questi processi da altri componenti come vapor acqueo, anidride carbonica CO_2 ed altri composti organici.

Una ventilazione non adeguata porta all'accumulo di tali agenti inquinanti con conseguenti rischi per la salute degli utenti. Invece una ventilazione corretta determina la sostituzione dell'aria contaminata con quella esterna e pertanto la riduzione delle concentrazioni di tali composti nocivi al di sotto di una certa soglia di sicurezza.

Alcune tra le più comuni sostanze nocive presenti all'interno di un ambiente chiuso sono:

- fumo di tabacco
- ossidi di azoto NO_x
- ossidi di zolfo
- monossido di carbonio CO
- ozono O_3
- particolato o polveri sottili (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$)
- composti organici volatili VOC
- idrocarburi policiclici aromatici (IPA)
- amianto e fibre minerali sintetiche

Molti di questi sono il risultato della combustione nei motori a combustione interna, come ad esempio le polveri sottili, gli ossidi di azoto e zolfo o il monossido di carbonio (che è appunto il prodotto di un ossidazione/combustione non completa del carbonio presente nel combustibile). Altri come i VOCs sono composti chimici organici. Questi in particolare sono caratterizzati da un'elevata tensione di vapore a temperatura ambiente e basso punto d'ebollizione che provoca l'evaporazione di molte molecole dalla fase liquida o solida del composto in cui si trovano verso l'aria dell'ambiente interno. Tra i VOCs più comuni troviamo la Formaldeide che avendo una temperatura di ebollizione pari a -19°C , evapora lentamente dalle vernici, dalle pitture e dai collanti utilizzati. Questi in linea generale non presentano una tossicità acuta ma a lungo termine possono avere effetti nocivi sulla salute umana. Alcune possibili sorgenti di VOC possono essere rappresentate da: attività umane, emissioni dei materiali da costruzione e arredo, uso di prodotti per la casa e per la pulizia degli ambienti.

La EN 16798 indica tre metodi differenti per quantificare il livello di qualità dell'aria interna:

1. Metodo basato sulla qualità dell'aria percepita
2. Metodo dei valori massimi per la concentrazione delle sostanze inquinanti
3. Metodo basato su portate predefinite di ventilazione

Metodo 1: questa metodologia impiega come tasso di ventilazione di progetto il maggiore tra il valore necessario per ridurre i rischi per la salute dovuti ad uno specifico inquinante e il tasso di ventilazione richiesto per ottenere un certo livello di qualità dell'aria; pertanto vediamo che il tasso di ventilazione di progetto si calcola in questo caso attraverso due componenti, la prima corrisponde alla ventilazione necessaria per rimuovere o quantomeno diminuire la concentrazione degli inquinanti generati dagli occupanti (bio effluents), mentre la seconda corrisponde alla ventilazione necessaria per rimuovere gli inquinanti prodotti dall'edificio o dagli impianti ad esso connessi; la formula seguente mi permette di ricavare il tasso di ventilazione totale necessario in corrispondenza della "zona di respirazione":

$$q_{\text{tot}} = n \cdot q_p + A_R \cdot q_B$$

dove:

q_{tot} è il tasso totale di ventilazione per la zona di respirazione, in $[\text{l/s}]$

n è il valore di progetto per il numero di persone presenti nell'ambiente

q_p è il tasso di ventilazione necessario per l'occupazione di una singola persona, in [l/s · persona]

A_R è l'area di pavimento, in [m²]

Q_B è il tasso di ventilazione per le emissioni dell'edificio, in [l/s·m²]

Nelle tabelle successive vengono indicati i valori delle grandezze appena citate in accordo con le linee guide dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS).

Categoria	Percentuale attesa insoddisfatta [%]	Flusso d'aria per persone non adattabile [l/s·pers]
I	15	10
II	20	7
III	30	4
IV	40	2,5

Figura 1.13: Tassi di ventilazione per la diluizione delle emissioni dovute agli occupanti in base alla differenti categorie

Categoria	Edificio molto poco inquinante, LPB-1 [l/s·m ²]	Edificio poco inquinante, LPB-2 [l/s·m ²]	Edificio non inquinante, LPB-3 [l/s·m ²]
I	0,5	1,0	2,0
II	0,35	0,7	1,4
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6

Figura 1.14: Tassi di ventilazione per diluire le emissioni in relazione alle differenti categorie di edificio

Metodo 2: si basa invece sul calcolo dei tassi di ventilazione per abbassare la concentrazione all'interno dell'ambiente di una specifica sostanza attraverso l'equazione:

$$Q_h = \frac{G_h}{c_{h,i} - c_{h,o}} \cdot \frac{1}{\epsilon v}$$

dove:

Q_h è il tasso di ventilazione necessario per la diluizione, in [m³/s]

G_h è il tasso di generazione di una sostanza, in [mg/s]

$c_{h,i}$ è il valore di riferimento sulla concentrazione per quella sostanza, in [mg/m³]

$c_{h,o}$ è la concentrazione della sostanza nell'aria, [mg/m³]

ϵv è l'efficacia della ventilazione

Volendo applicare questo metodo all'anidride carbonica CO₂, utilizzata anche come tracciante per rilevare l'occupazione di un ambiente, i valori limite sono definiti nella seguente tabella:

Categoria	Concentrazione di CO ₂ corrispondente ai valori in PPM per le persone non adattabili
I	550 (10)
II	800 (7)
III	1350 (4)
IV	1350 (4)

Figura 1.15: Concentrazione differenziale limite rispetto a quella esterna di anidride carbonica CO₂, assumendo un'emissione standard pari a 20 [l/h·persona]

Metodo 3: mi permette di determinare i valori minimi predefiniti del tasso di ventilazione che mi permettano di raggiungere sia i requisiti sulla qualità dell'aria percepita sia il minor livello di rischio per la salute; questo metodo viene espresso attraverso uno (o più) di questi parametri:

- Ventilazione totale di progetto per persone o componenti dell'edificio (q_{tot})
- Ventilazione di progetto per unità di area di pavimento (q_{m^2})
- Ventilazione di progetto per persona (q_p)
- Tassi di ricambio dell'aria di progetto (ach)
- Tassi di ventilazione di progetto per singolo ambiente e tipologia d'edificio (q_{room})

Questo metodo mi permette pertanto di esprimere il tasso di ventilazione sia in funzione del numero di occupanti sia in relazione all'area del pavimento, come indicato in Figura 16.

Categoria	Tasso di ventilazione per ambiente	
	[l/s·pers]	[l/s·m ²]
I	20	2
II	14	1,4
III	8	0,8
IV	5,5	0,55

Figura 1.16: Tasso di ventilazione predefinito dell'aria per ufficio (nel caso di persone non adattabili)

Apriamo infine una piccola parentesi riguardante le tipologie di edificio elencate all'interno della UNI EN 16798. La norma distingue tra "Edifici Poco Inquinanti" ed "Edifici Molto Poco Inquinanti". Un edificio in generale si dirà poco inquinante se la maggior parte dei materiali che caratterizzano l'ambiente interno emettono pochi inquinanti. La differenza tra le due tipologie risiede nella misura di tale affermazione, nel senso che un edificio sarà molto poco inquinante nel momento in cui tali limiti diventano ancor più restrittivi. La tabella in Figura 15 mostra i limiti per alcuni inquinanti in relazione alla tipologia d'edificio.

Sorgente	Prodotti basso emissivi per edifici poco inquinati [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Prodotti molto bassa emissivi per edifici molto poco inquinati [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Totale VOCs (CEN/TS 16516)	< 1.000	< 300
Formaldeide	< 100	< 30
Altri C1A o C1B VOC classificati come cancerogeni	< 5	< 5
Valore R (CEN/TS 16516)	< 1	< 1

Figura 1.17: Limiti all'emissione di alcuni inquinanti nelle differenti categorie d'edificio

1.3.3 Illuminazione nella UNI EN 16798

Benché questa trattazione si concentri maggiormente sul comfort termoigrometrico e sulla qualità dell'aria interna, il benessere di un soggetto all'interno di un ambiente dipende anche dal comfort visivo. Questo si definisce come "la personale condizione di soddisfazione in termini di illuminazione naturale, eventuale abbagliamento e resa cromatica". Il comfort visivo è determinato essenzialmente da:

- grado di prestazione visiva che corrisponde alla velocità ed accuratezza nello svolgimento di un cosiddetto "compito visivo"
- gradevolezza dell'ambiente che dipende dalla natura della luce (naturale o artificiale), dall'ambiente interno (caratteristiche dello spazio e delle superfici) e dall'occupante (attitudini, preferenze ed aspetti psicologici)

Un compito visivo fondamentale può essere l'osservazione di un dettaglio o di uno specifico oggetto nello svolgimento di una determinata attività: leggere, scrivere, percepire spazi o ingombri ecc. In generale, per consentire alle persone lo svolgimento efficace ed accurato dei compiti visivi, dovrebbe essere fornita un'illuminazione appropriata, sia essa naturale o artificiale. Il livello di visibilità e di comfort richiesti nella maggior parte dei posti di lavoro dipende dal tipo e dalla durata delle attività svolte. I requisiti illuminotecnici necessari a garantire il benessere visivo dipendono dalle seguenti tre esigenze fondamentali:

-comfort visivo: quando i lavoratori hanno una sensazione di benessere, indirettamente questo contribuisce anche ad ottenere alti livelli di produttività ed una più alta qualità del lavoro

-prestazione visiva: quando i lavoratori sono in grado di svolgere i loro compiti visivi anche in circostanze difficili e per periodi di tempo prolungati

-sicurezza: deve essere consentito lo svolgimento dell'attività ed il movimento in condizioni di sicurezza

Inoltre, l'ambiente luminoso è caratterizzato dai seguenti parametri in relazione alla luce diurna ed a quella artificiale:

- distribuzione delle sorgenti luminose
- illuminamento
- direzionalità della luce
- variabilità della luce (livelli e colore della luce)
- resa dei colori e apparenza del colore della luce
- abbagliamento
- sfarfallio

Pertanto sin dalla fase progettuale per ottenere adeguati livelli di comfort visivo, è doveroso definire attentamente:

- la collocazione, l'orientamento e le dimensioni dell'edificio
- l'ubicazione e la tipologia delle aperture
- il controllo della riflessione e degli abbagliamenti dati dalle superfici interne ed esterne
- la geometria interna dello spazio
- l'eventuale previsione di schermature

La luce naturale risulta essere un fattore di grande rilevanza nell'ambito del comfort visivo, questo perché riproduce in maniera fedele i colori, giova al benessere psico-fisico degli occupanti, ma soprattutto è gratuita. Pertanto, una corretta progettazione dell'illuminazione diurna ed un'integrazione ottimale della luce naturale ed artificiale possono contribuire in maniera significativa al risparmio energetico nell'edificio. Tuttavia, è chiaro che scegliere di basare l'illuminazione di un ambiente solo sull'apporto dato dalla luce naturale, porta una serie di svantaggi non indifferenti come ad esempio il fatto che, in funzione delle condizioni climatiche, un elevato irraggiamento solare in un ambiente chiuso nella stagione estiva comporta un notevole incremento dei carichi frigoriferi e quindi del fabbisogno energetico.

Fondamentalmente il comfort visivo viene definito attraverso due fattori: il livello di illuminamento ed il livello di abbagliamento. L'illuminamento è una grandezza fotometrica data dal rapporto tra il flusso luminoso (misurato il lumen [lm]) incidente su di una superficie elementare e l'area della superficie elementare stessa.

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lx} \right]$$

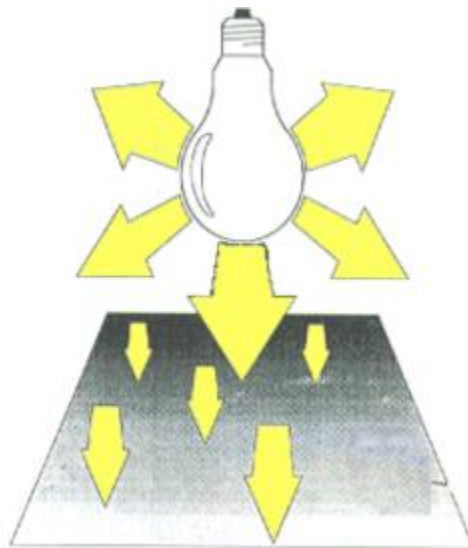


Figura 1.18: Espressione analitica e schema rappresentativo del concetto di illuminamento

Questa grandezza che, com'è evidente, fa riferimento all'oggetto illuminato piuttosto che alla sorgente, ha come unità di misura il lumen su metro quadro che prende il nome di lux. Nel progetto illuminotecnico poi dobbiamo tener conto anche del fattore di manutenzione che dipende dall'apparecchio di illuminazione scelto, dall'ambiente circostante in cui tale apparecchio è montato e dal programma di manutenzione specifico. Per cui vi sarà un "illuminamento medio mantenuto" dato dal prodotto del fattore di manutenzione per il livello di illuminamento fornito dall'impianto di illuminazione. Ovviamente il grado di illuminamento che si realizza all'interno di un certo ambiente deve essere il più possibile equilibrato, nel senso che non deve essere soggetto a fluttuazioni che possano poi provocare fenomeni di affaticamento visivo o abbagliamento molesto nell'utente.

Tuttavia, la quantità di luce diurna varia nel corso della giornata in funzione delle condizioni climatiche e dell'esposizione dell'edificio alla luce solare. Quindi negli ambienti interni la luce naturale diurna disponibile

decrese rapidamente col passare delle ore; questo può rendere necessario l'impiego di illuminazione supplementare, al fine di assicurare i livelli di illuminamento richiesti in corrispondenza delle postazioni di lavoro così da facilitare lo svolgimento dei compiti visivi. Come già detto la luce naturale costituisce un apporto gratuito, pertanto è fortemente consigliabile in fase di progettazione insistere sull'impiego di finestre sul posto di lavoro perché oltre a determinare un aumento del comfort visivo, offrono anche un contatto visivo con l'ambiente esterno, premurandoci però che queste non provochino effetti molesti quali perdita di privacy per l'occupante o riduzione del comfort termico (che andrebbe poi a gravare sui costi dell'energia).

Per i valori di progetto delle grandezze fotometriche in relazione al tipo di ambiente ed all'attività che ivi andrà svolta, facciamo riferimento alla Figura 19 presa dalla norma EN 12464-1 in cui sono specificati i valori minimi di illuminamento medio mantenuto, il grado di abbagliamento, l'uniformità dell'illuminamento e la resa cromatica della sorgente.

N° di rif. a UNI 12464-1	Tipo di zona, compito o attività	\bar{E}_m [lx]	UGR_L [-]	U_0 [-]	R_s [-]
5.26.1	Archiviazione, copiatura, ecc.	300	19	0,40	80
5.26.2	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati	500	19	0,60	80
5.26.3	Disegno tecnico	750	16	0,70	80
5.26.4	Postazioni CAD	500	19	0,60	80
5.26.5	Sale conferenze e riunioni	500	19	0,60	80
5.26.6	Banco della reception	300	22	0,60	80
5.26.7	Archivi	200	25	0,40	80

Figura 1.19: Valori minimi di progetto di alcune grandezze illuminotecniche in relazione al tipo di ambiente e all'attività svolta al suo interno

Un altro parametro di fondamentale importanza in relazione alla luce naturale è rappresentato dal "fattore medio di luce diurna". Questo si definisce come il rapporto tra il grado di illuminamento E che si realizza su di una superficie orizzontale posta all'interno dell'ambiente considerato grazie alla luce proveniente dalla volta celeste (non si considera perciò la radiazione proveniente dal sole), e l'illuminamento che contemporaneamente si ha su di una superficie orizzontale posta all'esterno senza alcuna ostruzione:

dove:

F è il fattore di luce diurna

E è l'illuminamento su una superficie orizzontale all'interno dell'ambiente considerato, in [lx]

E_0 è l'illuminamento su una superficie orizzontale posta all'esterno senza alcuna ostruzione, in [lx]

$$F = \frac{E}{E_0}$$

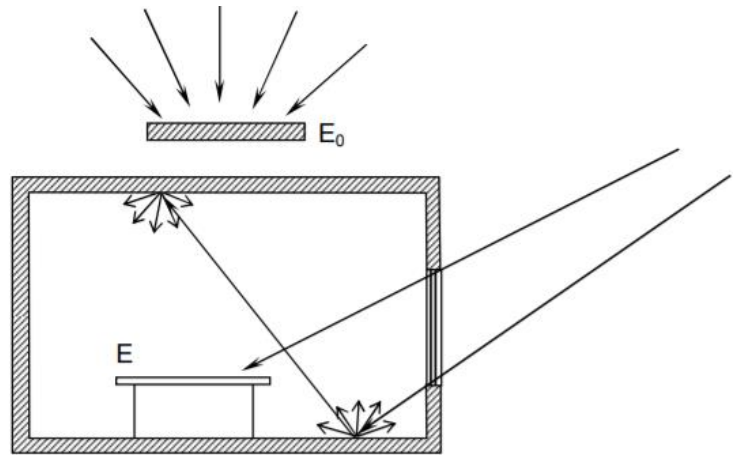


Figura 1.20: Rappresentazione grafica del concetto di fattore di luce diurna

Questo è funzione delle seguenti grandezze:

- area delle aperture finestrate
- coefficiente di trasmissione nel visibile del materiale trasparente che costituisce le finestre
- area dei diversi elementi che costituiscono l'involucro e che sono presenti all'interno del locale (pareti, pavimenti, soffitti, arredi..)
- presenza di ostruzioni di qualsiasi genere, esterne o interne, che limitino la vista della volta celeste
- stato delle superfici vetrate e di quelle interne

1.4 WELL Building Standard

Fin'ora abbiamo trattato il concetto di comfort limitatamente alla sensazione di benessere provata da un soggetto in un determinato ambiente, tuttavia negli ultimi anni un numero sempre maggiore di studi ha dimostrato come un individuo passi più del 90% del suo tempo in un ambiente indoor e come quest'ultimo incida profondamente sul nostro stile di vita. Pertanto nella progettazione degli edifici la tendenza futura non sarà più solo quella di garantire il benessere dell'occupante ma anche di migliorarne lo stile di vita. In quest'ottica sono stati scritti numerosi standard e certificazioni nazionali ed internazionali come il BREAM, il LEED, il CASBEE, il BEAM Plus e l'ESGB. Nel 2016 dopo anni di ricerche in collaborazione con fisici, scienziati e professionisti del settore, è stata pubblicata la prima versione della Certificazione WELL (WELL Building Standard). Questa considera l'ambiente interno come un veicolo per il raggiungimento del comfort, del benessere e della salute degli occupanti. In particolare un edificio con certificazione WELL può garantire un ambiente che aiuti gli utenti a migliorare l'alimentazione, l'attività fisica, il loro umore, la qualità del sonno, il comfort e le loro performance lavorative. La WELL rappresenta la punta di diamante in questo settore proprio perché, essendo il risultato del lavoro di un folto gruppo di scienziati durato diversi anni, utilizza un approccio al problema omnicomprensivo e multidisciplinare, mentre molte norme precedenti si concentravano solo su alcuni specifici aspetti del problema comfort. Lo stesso sistema sanitario fornisce le dovute cure ad un soggetto quando questo è già malato, quando invece dovrebbe pensare anche, in maniera previdente, a delle soluzioni per far sì che un soggetto non si ammali. È proprio qui la portata rivoluzionaria della Certificazione WELL, perché il suo scopo è quello di progettare un ambiente in cui venga minimizzato il rischio di insorgenza di malattie croniche come diabete, malattie cardiovascolari e tumori.

1.4.1 Struttura ed Organizzazione della WELL Building Standard

La Certificazione WELL è organizzata in sette categorie di benessere chiamate “Concepts”: Aria, Acqua, Alimentazione, Luce, Fitness, Comfort, Mente. Questi a loro volta sono divisi in 105 Features che rappresentano uno specifico aspetto della salute e del benessere degli occupanti. Anche i vari Feature sono suddivisi in una serie di Parts al cui interno sono specificati un insieme di requisiti che devono essere soddisfatti. In pratica per far sì che un progetto riceva il credito relativo ad una specifica Feature, ogni Parts deve essere soddisfatta. Notiamo però che, a seconda della tipologia di progetto, una Parts può non essere presente perché non applicabile in quella determinata categoria, il che significa che in quel particolare tipo di progetto la specifica Parts non ha una grande rilevanza.

Le feature si classificano poi in Preconditions ed in Optimizations. Le Preconditions rappresentano il nucleo della Certificazione WELL ovvero quelle particolari condizioni minime che devono essere obbligatoriamente soddisfatte se si vuole raggiungere la certificazione. Al contrario le Optimizations non sono necessarie per raggiungere il livello di certificazione Silver, quello più basso, ma per raggiungere certificazioni di livello Gold o Platinum, rispettivamente la certificazione media e massima, il progetto deve soddisfare un certo numero di Optimization come riportato nella tabella seguente.

Versione della certificazione	Livello della Certificazione	Preconditions che devono essere soddisfatte	Optimizations che devono essere soddisfatte
WELL Building Standard	Certificazione Silver	Tutte le Preconditions applicabili	Nessuna
	Certificazione Gold	Tutte le Preconditions applicabili	40% di quelle applicabili
	Certificazione Platinum	Tutte le Preconditions applicabili	80% di quelle applicabili
WELL Pilot Standard	Certificazione Silver	Tutte le Preconditions applicabili	20% di quelle applicabili
	Certificazione Gold	Tutte le Preconditions applicabili	40% di quelle applicabili
	Certificazione Platinum	Tutte le Preconditions applicabili	80% di quelle applicabili

Figura 1.21: Tabella delle Optimizations da soddisfare per raggiungere i vari livelli di certificazione WELL

Una delle particolarità del WELL risiede nel fatto che ad ogni Feature sono associati i vari sistemi e apparati del corpo umano che beneficiano del raggiungimento di tale Features. Quelli trattati sono: l'apparato cardiovascolare, l'apparato digerente, il sistema endocrino, il sistema immunitario, l'apparato tegumentario, il sistema muscolare, il sistema nervoso, l'apparato riproduttivo, l'apparato respiratorio, il sistema scheletrico e l'apparato urinario.

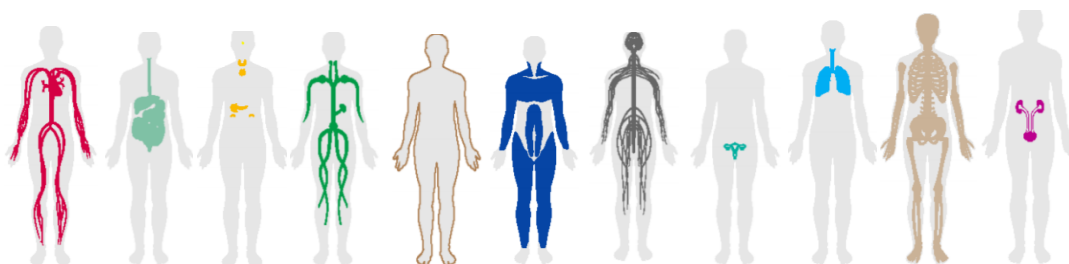


Figura 1.22: Sistemi ed Apparati del corpo umano

La WELL, come abbiamo già avuto modo di dire, divide i progetti in 3 categorie: Core and Shell, New and Existing Interiors e New and Existing Buildings. La categoria Core and Shell si riferisce sostanzialmente ai progetti di rinnovo che riguardano la struttura dell'edificio, la posizione delle finestre e le vetrate, i sistemi di riscaldamento, raffrescamento e di ventilazione ed infine la qualità dell'aria. La categoria New and Existing Interiors si rivolge invece a quei progetti che coinvolgono solo una porzione dello spazio dell'intero edificio oppure che coinvolgono l'intero edificio ma che non realizzano una ristrutturazione pesante. Infine la categoria New and Existing Buildings corrisponde a quei progetti in cui viene coinvolto tutto l'edificio e dove pertanto possono essere realizzate tutte le implementazioni presenti nella Features del WELL. Come precedentemente detto, in base al tipo di categoria non tutte le Features possono essere realizzate come mostrato nella Figura 23.

PROJECT TYPES	PRECONDITIONS	OPTIMIZATIONS	TOTAL
New and Existing Buildings	41	59	100
New and Existing Interiors	36	62	98
Core and Shell	26	28	54

Figura 1.23: Numero di Optimization e Preconditions applicabili in base alla tipologia di progetto

La valutazione dell'aderenza del nostro progetto allo Standard WELL si basa sull'assegnazione di un punteggio da parte di più specialisti che valutino ogni Concept separatamente. Inizialmente vengono analizzate le preconditions per ogni Concepts e poi viene assegnato il punteggio finale sulla base delle Optimizations raggiunte. Per cui:

Preconditions Totali=TP

Preconditions Raggiunte=PA

Optimizations Totali=TO

Optimizations Raggiunte=OA

Wellness Score=WS

Se $\frac{PA}{TP} < 1$, allora il $WS = \frac{PA}{TP} \times 5$ (arrotondato al primo numero intero inferiore) \Rightarrow

IL PROGETTO NON
RAGGIUNGE LA
CERTIFICAZIONE

Se $\frac{PA}{TP} = 1$, allora il $WS = 5 + \frac{OA}{TO} \times 5$ (arrotondato al primo numero intero inferiore) \Rightarrow

IL PROGETTO
RAGGIUNGE LA
CERTIFICAZIONE
WELL

Un punteggio inferiore a 5 denota il mancato raggiungimento di tutte le Preconditions, mentre un punteggio tra 5 e 6 permette di raggiungere la certificazione Silver, uno tra 7-8 la certificazione Gold ed uno tra 9-10 la certificazione Platinum. L'aggregato dei punteggi della certificazione WELL per ogni Concepts è mostrato nella WELL Scorecard. A titolo di esempio mostriamo il punteggio raggiunto per ogni Concepts e la relativa Scorecard di un ufficio che rientra nella categoria dei progetti di tipo New and Existing Buildings e che ha raggiunto, in base a quanto mostrato, la certificazione Gold.



CONCEPT	PRECONDITIONS		OPTIMIZATIONS		CONCEPT SCORES
	APPLICABLE	ACHIEVED	APPLICABLE	ACHIEVED	
Air	12	12	17	3	5
Water	5	5	3	0	5
Nourishment	8	8	7	7	10
Light	4	4	7	2	6
Fitness	2	2	6	3	7
Comfort	5	5	7	2	6
Mind	5	5	12	12	10
Total and WELL Score	41	41	59	29	7

Figura 1.24: Tabella dei punteggi per ogni categoria e Scorecard WELL di un ufficio con certificazione Gold

Capitolo 2. Sistema di misura: il Comfort Eye

Il Comfort Eye è uno strumento di misura innovativo realizzato e brevettato dal Laboratorio di Misure per l'Ambiente Costruito dell'Università Politecnica delle Marche (brevetto N.0001422135 – Sistema e metodo per il monitoraggio del comfort termico). Tale sensore permette di rilevare all'interno dell'ambiente in cui è installato, una serie di grandezze utili per la valutazione della qualità dell'ambiente interno (Indoor Environmental Quality IEQ Assessment). Il sistema è composto da tre nodi, due dei quali di misura ed uno impiegato per la raccolta dei dati e la connessione ad un server remoto (gateway).

Il primo dei due nodi di misura è costituito da uno scanner termico 3D caratterizzato da una sensore ad infrarossi IR a due gradi di libertà (rotazione attorno a due assi) il cui scopo è quello di fornire una mappa termica della distribuzione di temperatura nell'ambiente indoor.



Figura 2.1: Nodo di misura ad infrarossi del Comfort Eye

Capiamo perciò che questa tipologia di sensore rientra nella categoria dei sensori di temperatura senza contatto i quali si basano sul fenomeno dell'irraggiamento. Questi misurano la temperatura di un oggetto attraverso la radiazione emessa da quest'ultimo. Questo perché ogni corpo che si trovi ad una temperatura maggiore dello zero assoluto (0 K o -273,15°C) emette dalla sua superficie delle onde elettromagnetiche, con uno specifico spettro d'emissione, proporzionali alla temperatura intrinseca dell'oggetto stesso. Questo spettro d'emissione sarà caratterizzato da lunghezze d'onda che ricadono in parte nello spettro del visibile e da lunghezze d'onda tali per cui la radiazione associata viene percepita solo come energia termica. Quest'ultima tipologia rientra nello spettro dell'Infrarosso e per questo i sensori di temperatura ad irraggiamento sono essenzialmente ad Infrarossi, anche perché lunghezze d'onda superiori a quelle degli infrarossi per essere rilevate necessiterebbero di una sensibilità dello strumento non raggiungibile con la tecnologia attuale.

La relazione che lega la temperatura della superficie di un oggetto con la potenza termica emessa per irraggiamento, ovvero il cosiddetto potere emissivo, è data dalla legge di Stefan-Boltzmann per un corpo grigio che mi permette di tener conto del fatto che le superficie reali hanno un comportamento differente da quello di un corpo nero:

$$\dot{Q}_i = \varepsilon \sigma A T^4 \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right] \quad \text{costante di Stefan-Boltzmann}$$

Figura 2.2: Relazione di Stefan-Boltzmann per un corpo grigio

Come detto teniamo conto dello scostamento tra corpo grigio e corpo nero attraverso il coefficiente di emissività di una superficie che corrisponde al rapporto tra il potere emissivo della superficie reale e quello di un corpo nero alla stessa temperatura.

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_n(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4}$$

Figura 2.3: Coefficiente di emissività

Pertanto, ritornando allo scanner ad Infrarossi del Comfort Eye, questo dovrà essere installato sul soffitto della stanza in modo da misurare correttamente le temperature delle superfici interne. La mappa termica verrà poi inviata al gateway che calcolerà, in base a quanto rilevato, la temperatura media radiante. Questa soluzione mi garantisce almeno due vantaggi:

- posso effettuare in questo modo misurazioni multi-point della temperatura media radiante attraverso un unico sensore;
- insieme all'informazione sul comfort, la mappa termica delle superfici interne può essere impiegata per valutare le prestazioni energetiche dell'edificio individuando così eventuali ponti termici.

Facciamo un attimo chiarezza sul concetto di temperatura media radiante prima di andare avanti. Questa rappresenta la temperatura di un ambiente fittizio termicamente uniforme che scambierebbe con il corpo umano la stessa potenza termica radiante scambiata nell'ambiente reale. Questa può essere misurata attraverso uno strumento chiamato globotermometro. La relazione analitica che lega questa alla temperatura delle pareti è di questo tipo:

$$T_{mr} = \sqrt[4]{\frac{J_1 F_{p1} + J_2 F_{p2} + \dots + J_n F_{pn}}{\sigma_0}}$$

$$J = \sigma_0 \varepsilon T^4 + rG = \sigma_0 \varepsilon T^4 + (1 - \varepsilon)G$$

J =	Radiosità della parete
ε =	emissività della parete
T =	Temperatura della parete
r =	fattore di riflessione della parete
G =	Irraggiamento ricadente sulla parete
F_{pn} =	fattore di forma fra la persona e la parete i-esima

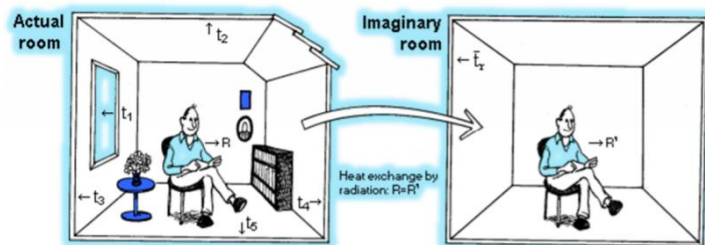


Figura 2.4: Espressione analitica e rappresentazione grafica del concetto di temperatura media radiante

Per ulteriori informazioni su questa grandezza, riferirsi alla norma UNI EN 27726.

La mappa termica realizzata dal sensore IR sarà data da un array di termopile 16x4, il che vuol dire che ad ogni frame acquisito corrisponde una mappa di 64 temperature. Il campo visivo di questo sensore è di 60x16°, pertanto verrà scansionata, con un singolo frame, un'area di 1.15x0.56 m appartenente ad una superficie posta ad un metro dal sensore. Per fornire la completa scansione verticale di un muro, il sensore è capace di realizzare un'inclinazione tra 0° e 180°, fornendo così anche la possibilità di misurare la temperatura del pavimento e del soffitto. La procedura di scansione è predefinita, per cui alcune correzioni geometriche possono essere applicate in post-processing per permettere la corretta ricostruzione della mappa termica. Per quanto riguarda il cablaggio invece, lo scanner IR richiede un apporto di potenza

elettrica di 12V. Il modulo WiFi incorporato permette la comunicazione con il gateway per la trasmissione dei dati.

Vediamo adesso il nodo di misura relativo alle misurazioni ambientali. Questo fondamentalmente è un nodo posizionato su un qualsiasi ripiano all'interno dell'ambiente indoor il quale acquisirà la grandezze ambientali utili per la valutazione del comfort termico e per la qualità dell'aria interna (IAQ Indoor Air Quality).



Figura 2.5: Nodo per le misurazioni ambientali del Comfort Eye

Il nodo include sensori per la rilevazione di:

- Temperatura dell'aria interna
- Umidità relativa
- CO₂
- TVOC
- Illuminamento

Questo nodo richiede un apporto di potenza elettrica di 5V, oltre ad essere alimentato a batteria. Quando questo è alimentato solo a batteria il sensore per la rilevazione di CO₂ viene spento a causa del suo alto dispendio energetico. Come lo scanner IR, questo nodo è equipaggiato di un modulo WiFi per la trasmissione di dati al gateway.

Nel contesto del progetto P2Endure, è stato sviluppato un nodo supplementare per la rilevazione di Particolato (Polveri sottili). Con il termine particolato si intendono le particelle carboniose solide, portate in sospensione dai fumi, originate da un'ossidazione incompleta. Queste particelle possono essere costituite o possono rivestirsi di sostanze tossiche o cancerogene. Se scaricate in ambiente, le polveri sottili vengono inalate ed in buona parte trattenute dai polmoni. Le più pericolose sono quelle di dimensioni inferiori a 10 µm (le cosiddette PM₁₀), che risultano più difficili da espellere dagli alveoli polmonari attraverso i sistemi fisiologici di difesa del sistema respiratorio. Nello specifico questo prototipo permette di misurare nell'ambiente la concentrazione di PM_{2,5} e PM₁₀.

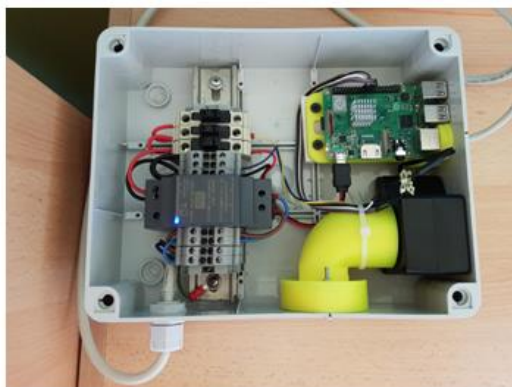


Figura 2.6: Nodo per la rilevazione di PM_{2,5} e PM₁₀

Il gateway invece è stato sviluppato specificatamente per l'applicazione nel progetto P2Endure, permettendo così di realizzare un approccio di monitoraggio a lungo termine. Questo gateway è basato su un RaspBerry Pi 3 di tipo commerciale al cui interno sono incorporati algoritmi e sistemi utili per:

- Comunicare con i nodi di misura e prelevare i dati rilevati;
- Memorizzare i dati grezzi;
- Comunicare con il server remoto (localizzato nel laboratorio dell'UNIVPM) al quale invierà continuamente dati grezzi con un intervallo di 15 minuti.

Il gateway comunque richiede una connessione internet, attraverso un network locale o con un router 4G, per funzionare.

Nel complesso l'architettura di funzionamento è del tipo mostrato nella Figura 7.

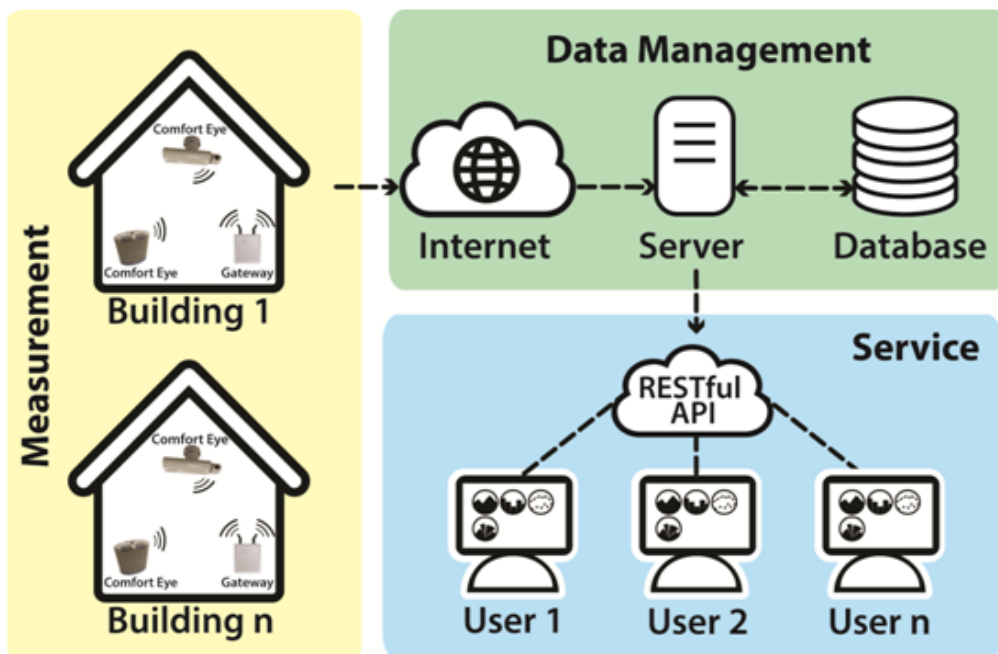


Figura 2.7: Funzionamento del sistema d'interfaccia con l'operatore

Il gateway viene installato in ogni edificio e successivamente viene connesso attraverso una connessione internet al server remoto dove i dati vengono processati per essere poi memorizzati in un database. Questa fase garantisce anche la pulizia dei dati non corretti e delle mappe termiche incomplete risultanti dal campionamento. I dati memorizzati poi sono disponibili per il loro impiego all'interno del database. È poi in

fase di sviluppo una Dashboard per la valutazione della performance IEQ e per la consultazione dei dati processati. Questa Dashboard è una web-app accessibile da qualunque browser su cui possono essere visualizzati i dati di ogni nodo congiuntamente ad un'analisi dettagliata dell'IEQ KPI (Key Performance Indicator).

Una bassa qualità dell'aria costituisce un rischio significativo per la salute di un individuo che spende la maggior parte del suo tempo in un certo ambiente indoor. Tuttavia, mentre la temperatura e l'umidità sono monitorate con maggior frequenza, nella maggior parte degli edifici non viene realizzato un monitoraggio in tempo reale della qualità dell'aria. Il Comfort Eye invece garantisce una misurazione real-time della qualità dell'aria attraverso un sistema a basso costo e facile da installare. Questo sensore fornisce informazioni precise e dettagliate riguardo la qualità dell'aria all'interno dell'ambiente in cui è installato in modo anche da poter pianificare eventuali interventi che permettano di migliorare la qualità dell'aria nel caso in cui questa non sia sufficientemente elevata.

L'anidride carbonica CO_2 è un gas inodore ed insapore, percepibile solo attraverso i suoi effetti negativi quali: malessere, difficoltà di concentrazione e calo delle performance lavorative. Generalmente ogni occupante all'interno di un ambiente chiuso rappresenta una fonte di inquinanti. In ambienti chiusi ad alta occupazione come classi scolastiche, uffici, meeting room; nel caso di ventilazione limitata, possono essere raggiunti valori di CO_2 tra i 5000 ed i 6000 ppm. Per avere una buona qualità dell'aria però non deve essere superato il limite di 1000 ppm.

Pertanto, un sistema di monitoraggio efficiente dovrebbe rilevare ogni variazione istantanea della qualità dell'aria, dando dei feedback all'utente sui valori attuali della concentrazione di CO_2 , azionando di conseguenza i meccanismi necessari (se presenti) per migliorare le performance e proteggere la salute degli occupanti, attraverso sistemi che permettano l'apporto di aria fresca o attraverso sistemi di ventilazione naturale o meccanica. Il nodo per le misurazioni ambientali comunica all'utente, in tempo reale, i valori misurati della concentrazione di CO_2 attraverso un metodo semplice ed intuitivo. Se i valori di CO_2 sono inferiori a 700 ppm si accende un LED di colore verde che comunica all'utente che il valore attuale è accettabile e che la qualità dell'aria è buona, pertanto non è necessaria l'attivazione di sistemi di ventilazione. Se i valori invece sono compresi tra 700 e 1000 ppm si accende un LED di colore giallo, il quale indica che i valori rilevati sono pericolosamente vicini al limite consentito ed è quindi consigliabile ventilare opportunamente l'ambiente. Infine, se il valore supera i 1000 ppm si accende un LED di colore rosso, per cui il valore ha superato il limite consentito il che implica che sarà necessario realizzare una ventilazione dell'ambiente, meccanica o naturale che sia.



Figura 2.8: LED a colori per la comunicazione all'utente del livello di qualità dell'aria

Concludiamo poi andando a riassumere le grandezze misurate da questo sensore innovativo con le loro relative accuratèzze.

Parametro	Accuratezza
Temperatura aria [°C]	±0.3
Umidità relativa [%]	±2
Velocità dell'aria [m/s]	±0.06
Temperatura superficie [°C]	±1
Temperatura media radiante [°C]	±0.5
Radiazione solare [W/m ²]	±5% reading
Predicted Mean Vote (PMV)	±0.2(**)

Figura 2.9: Grandezze misurate dal Comfort Eye, con relative incertezze

Capitolo 3. Aggiornamento ed implementazione del Comfort Module alla UNI EN 16798

All'interno del progetto NewTREND, finanziato dall'Unione Europea nel contesto del programma Horizon 2020, è stato sviluppato un modulo sul comfort termico che permette di valutare le performance di un edificio in relazione al design termico, adottando al contempo differenti modelli di comfort (adattivo e predittivo). Questo modulo, insieme ad altri due inerenti il comfort acustico e il comportamento dell'occupante, consentiranno all'SDH (Simulation and Design Hub) di fornire al team di progettazione informazioni utili per prendere decisioni sugli interventi di retrofit più efficaci da un punto di vista economico, di comfort e di efficienza energetica dell'edificio.

Più nel dettaglio, il modulo di comfort termico ottiene i risultati della simulazione IESVE (Integrated Environmental Solutions Virtual Environment) e calcola le condizioni operative medie per valutare la loro posizione in relazione alle zone di comfort dettate dai modelli di comfort. Lo scopo finale di questo modulo è di guidare il processo decisionale in modo da realizzare una progettazione funzionale al tipo di edificio/distretto. Tale modulo processa dati risultanti da una simulazione e realizza così delle analisi finalizzate non solo alla valutazione delle prestazioni dell'edificio in termini di conformità alle norme, ma anche alla valutazione della deviazione e della sensibilità di alcuni indici funzionali (come il PMV o la temperatura operativa) in funzione di altri parametri ambientali. Questo naturalmente permette di aiutare l'utente nella scelta della soluzione di retrofit più efficace.

3.1 Modulo sul Comfort Termico

Questo è un componente dell'SDH che raccoglie i risultati della simulazione dal modello e processa i dati per realizzare la valutazione del comfort termico. L'obiettivo del modulo è quello di fornire all'utente, anche nel caso questo non sia esperto in materia di comfort, gli indicatori necessari a capire come l'edificio si stia comportando in relazione alle performance energetiche e se sia realizzato al suo interno il comfort termico. Per essere più generali possibile e quindi includere la maggior parte delle tipologie di edificio, vengono impiegati congiuntamente modelli diversi. Le principali caratteristiche di questo modulo sono:

- Calcolo degli indici PMV e PPD in accordo con la ISO 7730;
- Calcolo della temperatura di comfort adattivo secondo la ISO 15251, la ASHRAE 55-FMC e la ASHRAE 55-NMC;
- Valutazione del Comfort per la stagione estiva e invernale (rispettivamente Cooling Season e Heating Season) in accordo con la classificazione data dalla EN 15251;
- Stima della varianza degli indicatori di comfort basata sulla fluttuazione dei dati di input per verificare che il 95% delle condizioni operative rientrino all'interno della zona di comfort in accordo col modello di comfort scelto (la ISO 15251 prescrive una deviazione massima del 5%);
- Analisi della sensibilità, basata sul metodo Monte Carlo, in modo da identificare i parametri con le criticità maggiori;
- Calcolo del KPI basato su degli indicatori a lungo termine per verificare il rispetto delle norme sul comfort.

L'utente può perciò scegliere il modello di comfort da utilizzare e la stagione di riferimento per l'analisi (Heating o Cooling). Quindi il modulo svolge il calcolo ed il risultato è un'interfaccia in cui sono presenti gli indici di comfort con l'analisi della loro varianza e sensibilità, cosa che viene mostrata anche graficamente. Così facendo l'utente può confrontare tra di loro le differenti soluzioni di retrofit, rapportandole anche alla condizione precedente all'intervento di retrofit.

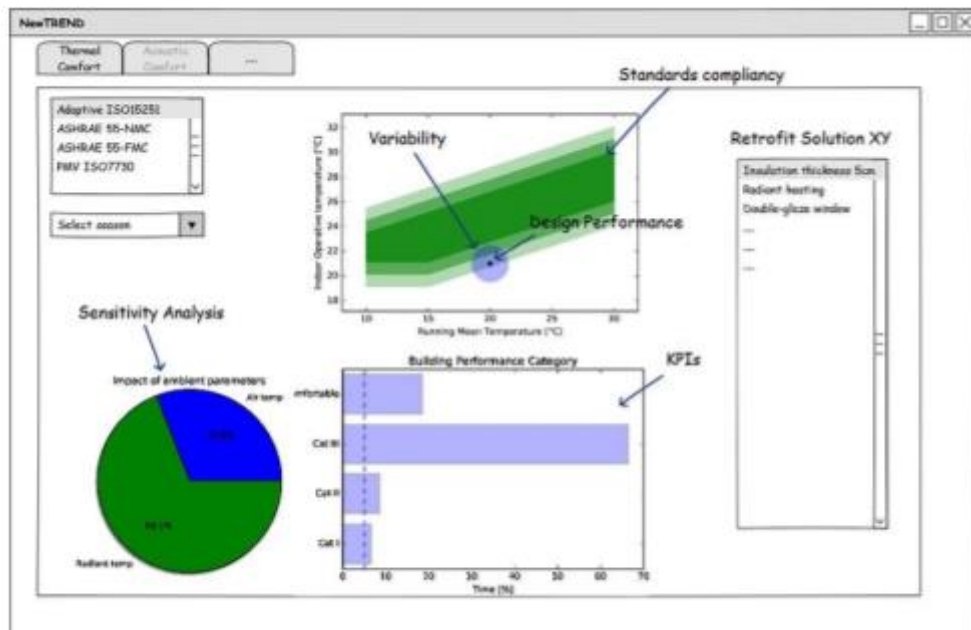


Figura 3.1: Modello in fase di sviluppo dell'interfaccia del modulo sul comfort termico

3.1.1 Applicazione del Metodo Predittivo

Il modulo sul comfort termico in questo caso fa uso del modello predittivo e quindi degli indici PMV e PPD per verificare se le condizioni siano di comfort o meno. Le varie categorie di comfort del modello predittivo si possono rappresentare attraverso delle zone di comfort sul diagramma psicrometrico, come mostrato nella Figura 2.

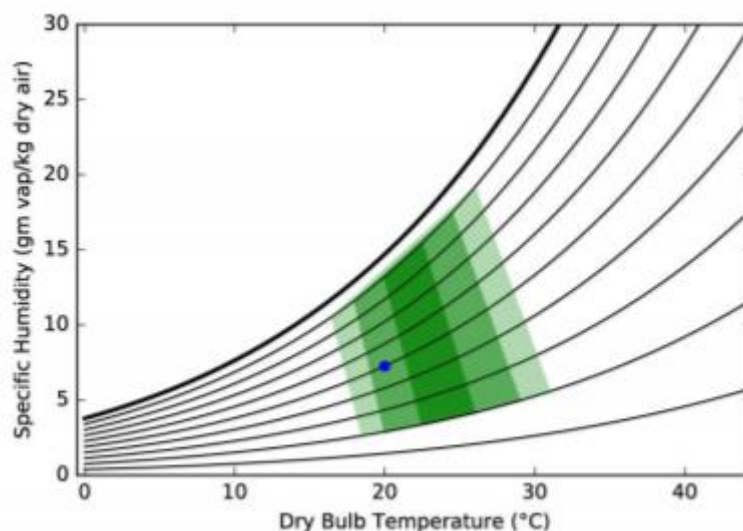


Figura 3.2: Rappresentazione grafica delle zone di comfort sul diagramma psicrometrico

Tali zone identificano le aree dove la combinazione della temperatura dell'aria di bulbo umido e l'umidità specifica rispecchiano i limiti del PMV imposti dalle varie categorie, ponendo gli altri parametri ambientali costanti. La figura 2 nello specifico mostra la condizione dell'edificio nel caso in cui questo si trovi nella stagione invernale, attraverso il puntino di colore blu. Le categorie di comfort che abbiamo nominato sono quelle che fanno riferimento alla norma EN 15251, dove la quarta categoria non viene rappresentata

graficamente perché automaticamente tutti i punti che non rientrano nelle tre precedenti appartengono alla categoria 4.

3.1.2 Applicazione del Metodo Adattivo

Il modulo, nel caso in cui l'utente scelga di impiegare il metodo adattivo, permette di scegliere tra il modello dato dalla EN 15251, quello dato dalla ASHRAE 55 NMC e quello della ASHRAE 55 FMC. Noi per i fini della nostra trattazione, analizzeremo solo il modello della EN 15251. La filosofia dietro questa norma è quella di fornire strumenti e metodi per la valutazione IEQ in relazione anche alle performance energetiche dell'edificio attraverso un metodo di classificazione composto da 4 categorie. I range che rappresentano le varie categorie sono forniti a partire della seguente equazione regressiva:

$$T_o = 0.33 \cdot T_{rm} + 18.8$$

Figura 3.3: Espressione della temperatura operativa ottimale

dove T_o rappresenta la temperatura operativa ottimale (in °C) e la T_{rm} la media mobile della temperatura esterna (in °C), calcolata attraverso la temperatura esterna media giornaliera.

$$T_{rm,n} = T_{dm,(n-1)} + 0.8 \cdot T_{dm,(n-2)} + 0.6 \cdot T_{dm,(n-3)} + 0.5 \cdot T_{dm,(n-4)} + 0.4 \cdot T_{dm,(n-5)} + 0.3 \cdot T_{dm,(n-6)} + 0.2 \cdot T_{dm,(n-7)} / 3.8$$

Figura 3.4: Relazione che lega la media mobile alla temperatura media giornaliera dell'ambiente esterno

Usando la relazione in Figura 3, il modulo calcola le zone di comfort come intervalli predefiniti, centrati sulla T_o , in accordo con la classificazione caratteristica della EN 15251. Le ampiezze degli intervalli sono di $\pm 2^\circ\text{C}$, $\pm 3^\circ\text{C}$, $\pm 4^\circ\text{C}$ per le categorie I, II e III. La categoria 4 come visto precedentemente corrisponde a quella al di fuori delle altre tre e quindi al di fuori del range di $\pm 4^\circ\text{C}$. La rappresentazione grafica di quanto appena detto sarà di questo tipo.

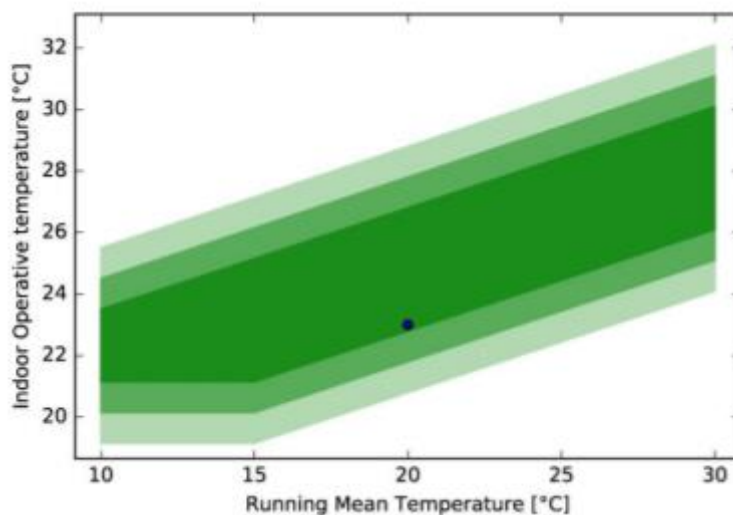


Figura 3.5: Zona di comfort secondo la EN 15251 utilizzando il metodo Adattivo e rappresentazione della condizione operativa dell'edificio

3.1.3 Analisi della Varianza e della Sensibilità

Il modulo di comfort termico effettua un'analisi della varianza e della sensibilità attraverso metodi di natura statistica. Quest'analisi impiega il cosiddetto Metodo Monte Carlo, che rappresenta una classe di algoritmi basata sul campionamento random ripetuto, così da ottenere, attraverso un modello, dei risultati numerici. Il modello MC è uno strumento molto potente per valutare l'incertezza degli output di un certo modello in base alla perturbazione di alcuni parametri di input ed in base alla sensibilità del modello a questi input.

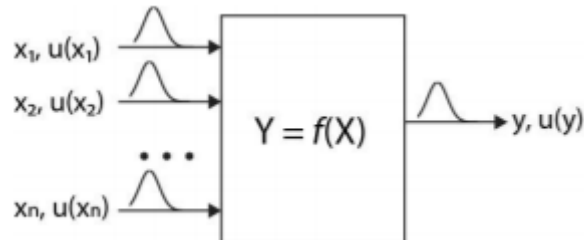


Figura 3.6: Schema rappresentativo del metodo Monte Carlo

L'idea alla base di questo metodo è quella di perturbare il modello, assegnando una certa distribuzione ai parametri di input e calcolare la distribuzione del rispettivo output. La procedura generale consiste nel:

- Selezionare la distribuzione di determinate variabili del modello la quale sarà basata su una determinata deviazione (standard);
- Generazione dei campionamenti random delle variabili del modello;
- Valutazione del modello per ogni variabile di input;
- Analisi dell'incertezza (in questo caso intesa come varianza la quale rappresenta le fluttuazioni nel dominio del tempo) e della sensibilità.

Gli output di quest'analisi sono:

- Quantificazione della dispersione attorno alle condizioni di progetto: la perturbazione di ogni variabile di input è determinata attraverso la fluttuazione attorno al valor medio; ciò è utile per valutare come il design termico si comporta rispetto alle zone di comfort richiesto;
- Quantificazione dell'impatto di ogni input sulle performance termiche finali: gli indici di sensibilità sono calcolati e rappresentati in percentuale, pertanto la somma di tutti gli indici deve essere pari necessariamente al 100%; identificare i parametri che hanno un'influenza maggiore è importante per guidare l'utilizzatore nella soluzione di retrofit di maggior efficacia.

Vediamo adesso nello specifico come viene realizzata l'analisi di varianza. Questa assegna ad ogni parametro di input una perturbazione in funzione della sua deviazione standard, calcolata sulla base della serie temporale fornita dalla simulazione, attraverso una relazione di questo tipo:

$$\delta(x_i) = k\sigma_{x_i}$$

dove:

δx_i è la varianza del parametro di input x_i ;

k è il fattore di copertura (qui preso pari a 2, il che significa che il 95% dei valori della distribuzione cadono all'interno dell'intervallo dato dal valor medio più o meno il valore del fattore di copertura moltiplicato per la deviazione standard);

σ_{x_i} è la deviazione standard del parametro di input x_i in relazione alla serie temporale di dati appena calcolata.

Una volta calcolata la perturbazione, per ogni parametro di input determiniamo la rispettiva distribuzione, con valore medio dato dal valor medio della distribuzione stessa e intervallo della distribuzione dato da δx_i . A questo punto i dati vengono campionati in maniera casuale dalla distribuzione e forniti come input al modello di comfort, generando così un vettore di 10^4 valori dell'output (PMV o T_o). Infine, la deviazione dell'output verrà semplicemente calcolata come la deviazione degli elementi di questo vettore.

Modello Predittivo

Vediamo adesso l'applicazione di quanto appena detto prima al modello predittivo e poi a quello adattivo. Nel caso in cui si consideri il modello predittivo, l'analisi di varianza si concentrerà naturalmente sul PMV applicando però la perturbazione non a tutte le sei variabili che lo caratterizzano, ma solo su quelle date dalla simulazione IESVE (temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa e velocità dell'aria, dove quest'ultima però varia solo a seconda della tipologia di edificio considerato). Il risultato di quest'analisi può essere visualizzato graficamente sul diagramma psicrometrico attraverso un intorno circolare centrato ovviamente sulle condizioni operative nominali.

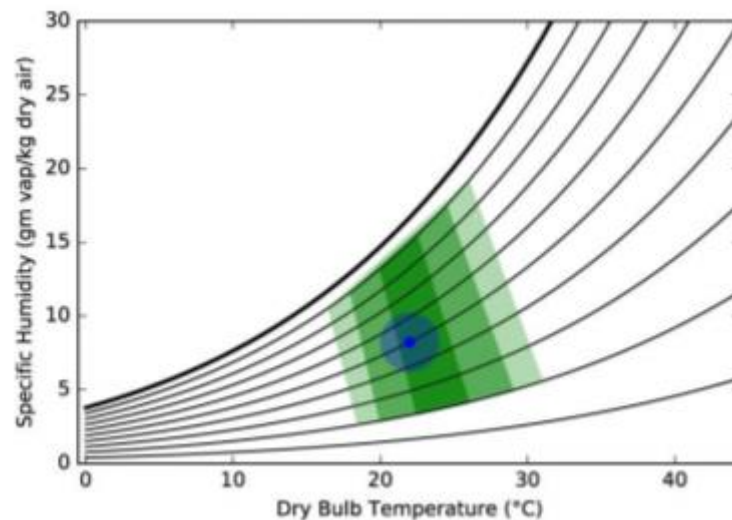


Figura 3.7: Rappresentazione grafica della varianza del PMV, calcolata attraverso l'analisi della varianza

Il significato del grafico appena mostrato consiste nel fatto che non possiamo dire in assoluto che il nostro edificio si trovi sempre all'interno della categoria I, come potremmo pensare facendo riferimento al puntino blu indicante le condizioni nominali di progetto, ma dovremmo considerare eventuali fluttuazioni delle condizioni operative che possano portare l'ambiente ad operare anche in categorie superiori alla I come mostrato nella Figura appunto.

Modello Adattivo

L'analisi di varianza si concentra in questo caso sulla temperatura operativa T_o e pertanto sui parametri di input che la influenzano (temperatura dell'aria e temperatura media radiante). La rappresentazione grafica della varianza è del tutto simile a quella vista precedentemente.

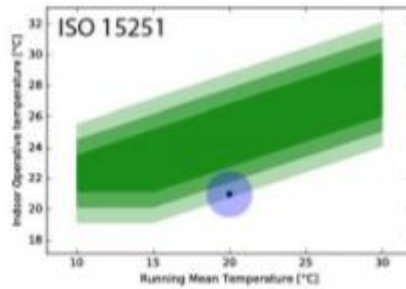


Figura 3.8: Rappresentazione grafica della varianza della temperatura operativa

L'analisi della sensibilità dà invece una misura di quanto è elevato il contributo di ognuno dei parametri di input per il calcolo della deviazione degli output. Il fine è quello di evidenziare il parametro con la maggiore criticità in modo tale da direzionare il retrofit verso la soluzione più efficace. Ad esempio, se questo parametro fosse la temperatura media radiante, dovremmo concentrarci sul progetto delle superfici vetrate. La procedura generale consiste nel:

- Calcolo delle condizioni di riferimento attraverso il valor medio di ogni serie temporale;
- Generazione di una distribuzione uniforme randomica per ogni parametro investigato;
- Perturbazione del modello realizzata assegnando come input per uno dei parametri la distribuzione uniforme relativa mentre agli altri parametri associamo il loro valore di riferimento;
- Calcolo della varianza degli output V_{xi} , data dalla perturbazione precedente, relativa al parametro di input i-esimo;
- Ripetizione dei due punti precedenti per tutti i parametri di input;
- Perturbazione del modello attraverso l'inserimento delle distribuzioni uniformi di tutti i parametri, in modo tale da calcolare la varianza complessiva dell'output V_{tot} ;
- Calcolo degli indici di sensibilità del primo ordine attraverso un metodo basato sulla varianza S_i del parametro i-esimo che sarà data dal rapporto tra la varianza relativa al parametro i-esimo e la varianza complessiva

Attraverso questo metodo vediamo che la somma di tutti gli indici di sensibilità corrisponde all'unità e che pertanto ogni indice può essere rappresentato come una percentuale della varianza totale il che implica che maggiore sarà il valore di S_i e maggiore sarà l'impatto del relativo parametro sulla variazione dell'output. Vediamo che il risultato di tale analisi verrà rappresentato attraverso una pie-chart (diagramma a torta) così da facilitare l'utente nell'interpretazione dell'analisi.

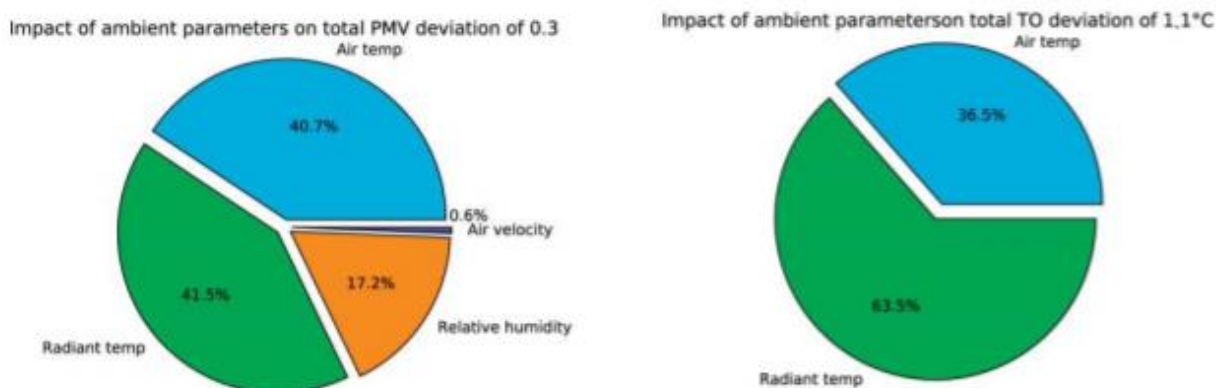


Figura 3.9: Esempio del risultato di un'analisi di sensibilità impiegando distintamente il modello adattivo e predittivo

3.1.4 Calcolo del KPI

Il modulo sul comfort termico calcola i seguenti KPIs:

- KPI relativo alla qualità dell'aria interna
- KPI relativo al comfort nella stagione estiva in un ambiente sprovvisto di sistemi di raffrescamento
- KPI relativo al comfort termico nella stagione estiva (Cooling Season)
- KPI relativo al comfort termico nella stagione invernale (Heating Season)

Un esempio della rappresentazione grafica del KPI è fornito nella Figura 10 dove il calcolo è effettuato facendo riferimento alla norma UNI EN 15251 (nelle due bar-chart in alto) ed alla UNI EN 7730 (nelle due bar-chart in basso) per il monitoraggio del comfort a lungo termine.

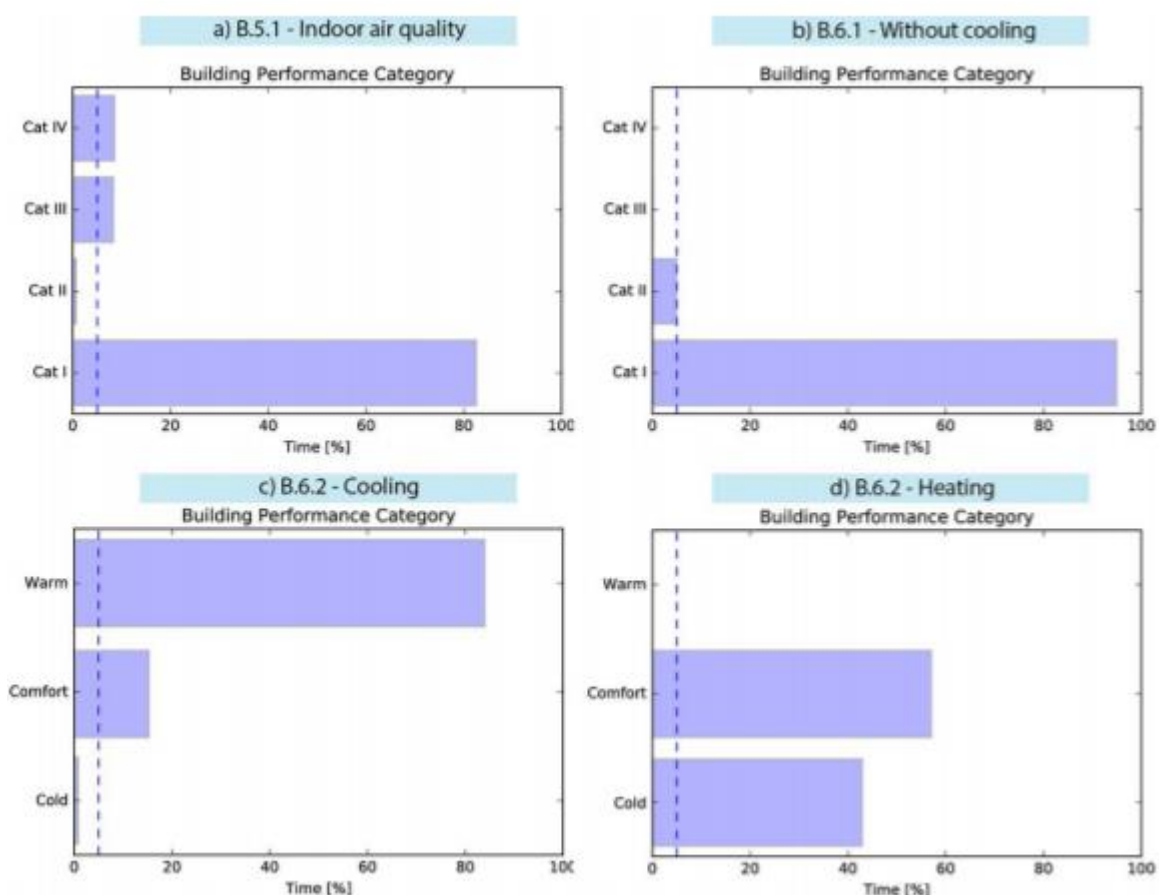


Figura 3.10: Rappresentazione grafica del KPI calcolato dal Comfort Module

Questo modulo pertanto non solo calcola i valori del KPI per la specifica categoria ma assegna ad ogni categoria il valore corrispondente in modo da fornire una rappresentazione complessiva delle condizioni in cui opera l'edificio nell'arco del tempo. Anche se la CO₂ non fa parte dell'ambito prettamente termico, il calcolo del relativo KPI è stato incluso all'interno del modulo sul comfort termico.

3.2 Differenze tra le norme UNI EN 16798 e UNI EN 15251

Come abbiamo avuto modo di vedere, il comfort module fa riferimento alla norma UNI EN 15251 che è stata sostituita nel 2019 dalla nuova UNI EN 16798. Il nostro obiettivo è stato quello di aggiornare il comfort module alla nuova norma e, se necessario, di implementarlo in funzione di quanto prescritto dalla norma ora vigente. Per fare ciò è necessario tuttavia andare ad evidenziare in cosa queste si differenziano.

La prima differenza che andiamo a notare, nel caso in cui ci riferissimo ad edifici dotati di sistemi di raffrescamento e riscaldamento meccanici (modello predittivo), riguarda i range relativi alla differenti categorie di comfort. Quello che vediamo è che mentre i limiti inferiori e superiori del PMV per le prime tre categorie di comfort sono completamente invariati, per la quarta categoria c'è stata una variazione. Difatti mentre nella UNI EN 15251, se il PMV era minore di -0,7 o maggiore di 0,7 automaticamente ci trovavamo in categoria 4, la nuova norma prescrive dei limiti superiore ed inferiore ($-1 < PMV < +1$), rendendo così il range di comfort limitato.

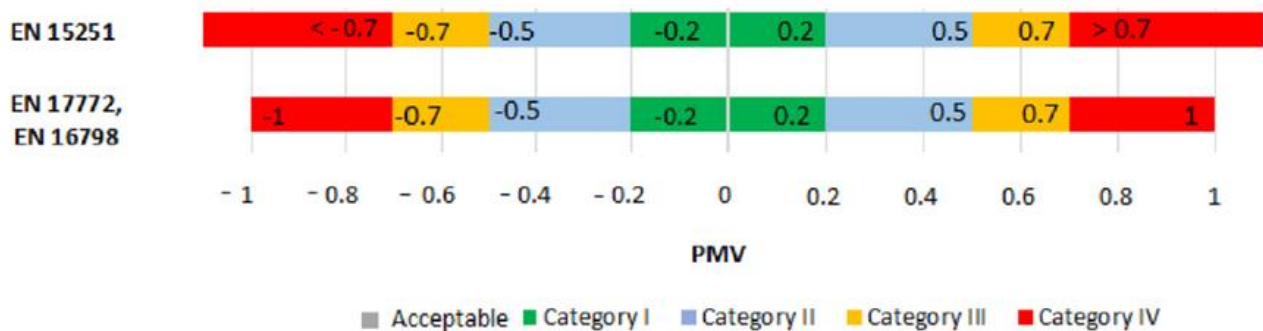


Fig. 1. Predicted mean vote (PMV) limits.

Figura 3.11: Rappresentazione della differenza tra i range del PMV delle categorie di comfort relativi alle due diverse norme

Stesso discorso vale ovviamente per il PPD, infatti per la 15251 il range della categoria 4 raccoglie tutti i valori del PPD maggiori di 15 mentre la categoria 4 nella 16798 comprende tutti i valori compresi tra 15 e 25.

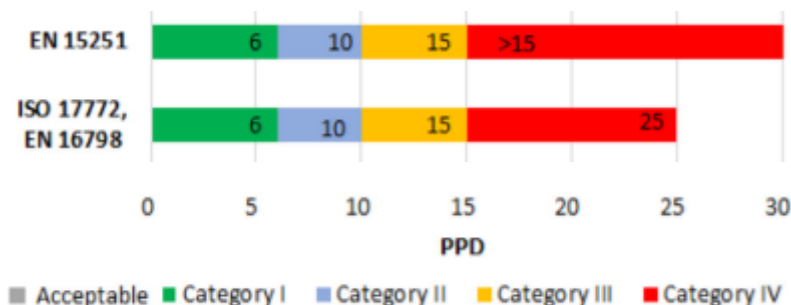


Figura 3.12: Range del PPD per le categorie di comfort relative alla due differenti norme

Vediamo adesso che anche i range delle temperature operative di comfort, per edifici con sistemi meccanici di climatizzazione (modello adattivo), sono differenti tra una norma e l'altra. Evidenziamo perciò le

differenze direttamente attraverso la Figura 13 in cui sono distinti i diversi range anche a seconda della natura dell'edificio (spazio residenziale o non residenziale) ed a seconda della stazione di riferimento.

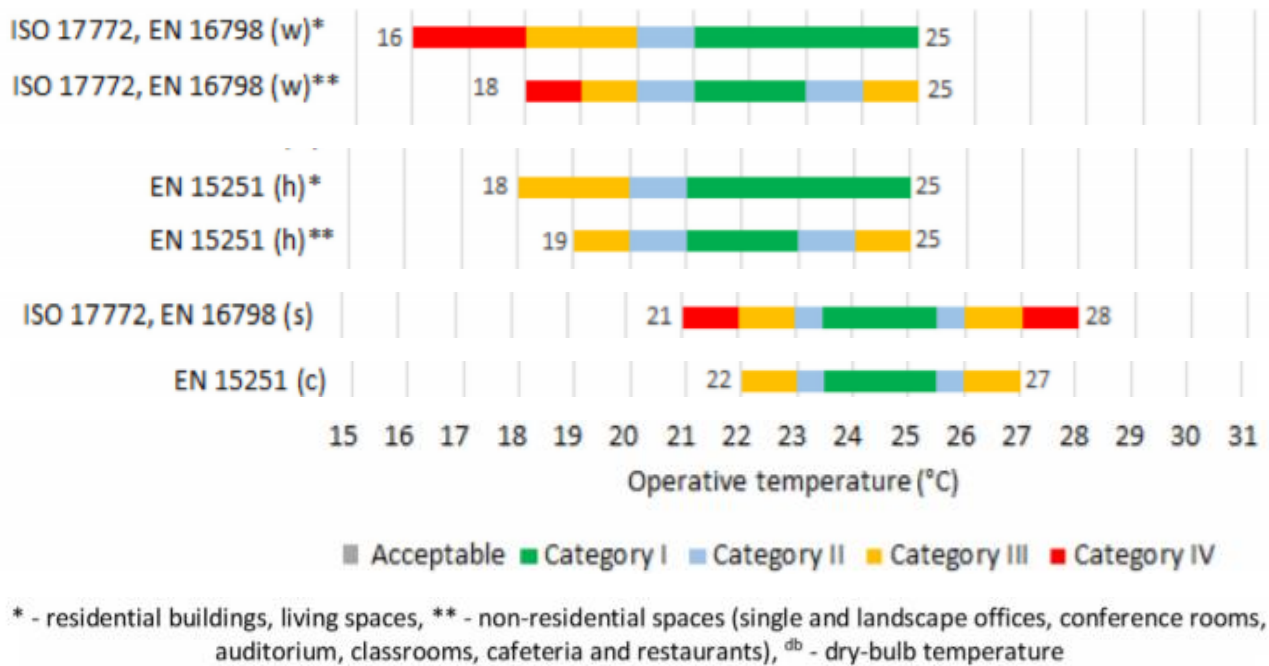


Figura 3.13: Limiti per la temperatura operativa in ambienti con sistemi meccanici di climatizzazione

Questi range di temperatura sono ottenuti considerando però uno specifico valore della velocità dell'aria all'interno dell'ambiente, che abbiamo considerato essere pari a 0,2 m/s. Tuttavia, un suo eventuale incremento può generare una variazione di tali range dal momento che la velocità dell'aria influisce sullo scambio termico convettivo e quindi sulla sensazione di caldo o freddo da parte degli occupanti. Quanto appena detto implica che un eventuale aumento della velocità dell'aria U si tradurrà in un aumento della temperatura operativa di comfort. Tale incremento rappresenta un'ulteriore differenziazione tra le due norme che prescrivono valori diversi, come mostrato nella Figura 14.

Standard	Temperatura di riferimento in °C	Incremento accettabile della T operativa in K		
		$U_{air}=0,6$ m/s	$U_{air}=0,9$ m/s	$U_{air}=1,2$ m/s
UNI EN 16798	>25	1,2	1,8	2,2
UNI EN 15251	26	2,1	2,8	3,3

Figura 3.14: Incremento di temperatura (operativa) in relazione alla velocità dell'aria

Passando poi agli edifici sprovvisti di sistemi meccanici di raffreddamento, impiegando il modello adattivo si possono riscontrare delle differenze tra gli approcci dati dalla due norme.

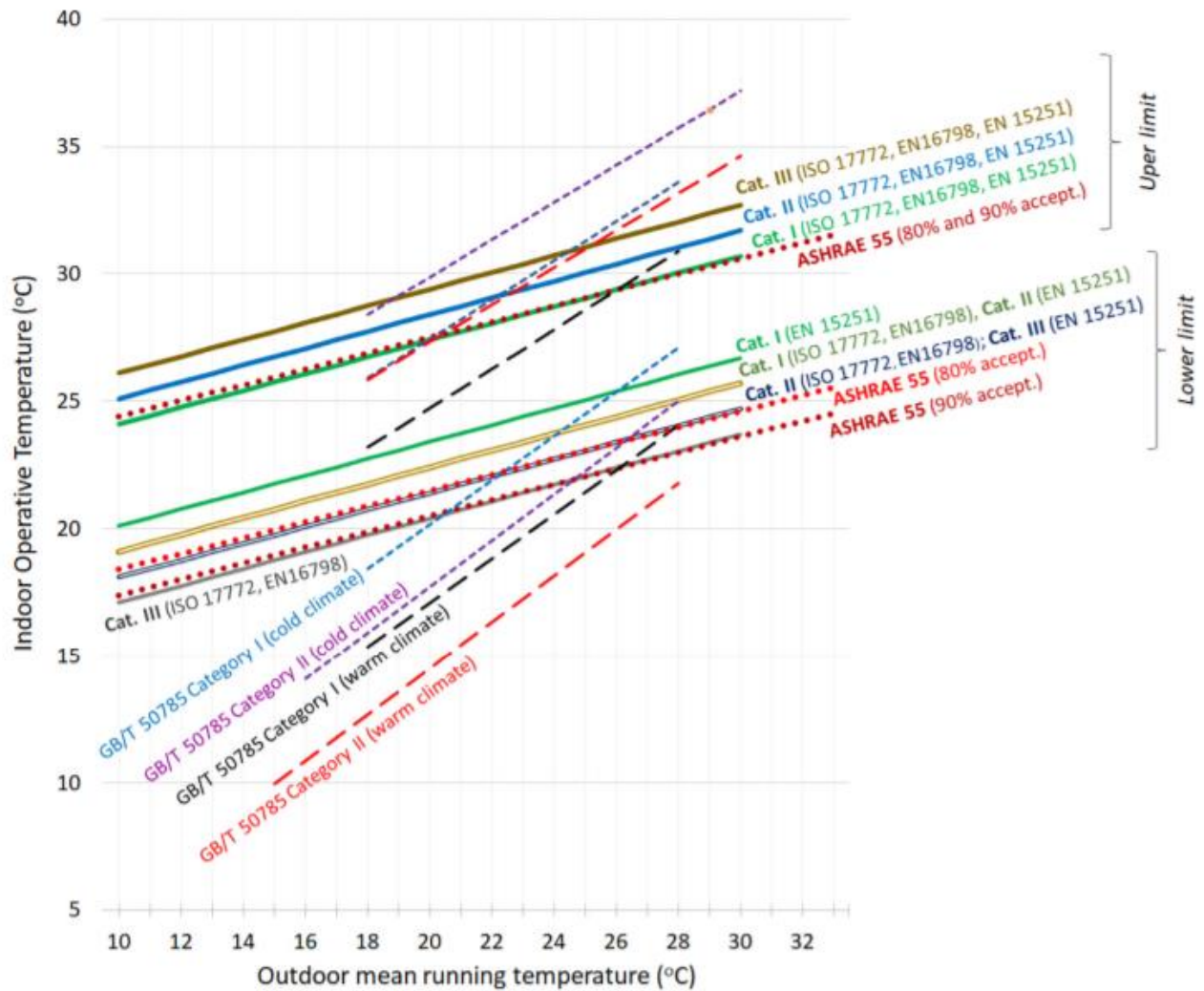


Figura 3.15: Limiti superiori ed inferiori per la temperatura operativa di categorie di comfort differenti relativa a norme nazionali ed internazionali diverse

Nella Figura 15, sono evidenziati i vari limiti superiori ed inferiori che identificano i range di ogni categoria di comfort, anche relativi a norme su cui non ci siamo concentrati ma che possono essere interessanti per capire come le varie normative nazionali ed internazionali si comportano in relazione al problema comfort indoor. Quello che possiamo notare, facendo riferimento alla 15251 ed alla 16798, è che in primis i limiti inferiori delle singole categorie nella 16798 sono stati shiftati verso il basso di un grado rispetto a quelli della 15251. Inoltre, notiamo, anche se tale aspetto non è presente nella figura in alto, che nel range 10-15°C i limiti inferiori della 15251 presentano un andamento costante mentre nella 16798 viene mantenuto l'andamento lineare anche in questo range.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria, cominciamo rappresentando i range del PPD relativi alle diverse categorie.

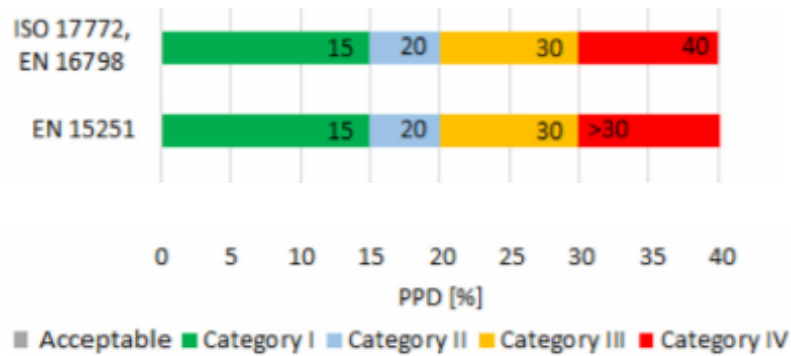


Figura 3.16: Range del PPD per le categorie di comfort in relazione alla qualità dell'aria

Vediamo che, in linea con il comfort termico, le due norme prescrivono un range limitato per la categoria 4 nel caso della 16798 e non limitato nel caso della 15251. Inoltre, le due norme distinguono gli edifici in “poco inquinanti” (low-polluting) e “molto poco inquinanti” (very-low polluting). Tuttavia, tale distinzione, come mostrato dalla tabella seguente, non viene effettuata allo stesso modo, infatti queste prescrivono valori differenti per le concentrazioni di agenti inquinanti all'interno dell'edificio.

Standards	ISO 17772, EN 16798*		EN 15251	
	Low	Very low	Low	Very low
Emission rate	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	
Total VOC (TVOC)	< 1000	< 300	< 0.2	< 0.1
Formaldehyde	< 100	< 30	< 0.05	< 0.02
Ammonia	-	-	< 0.03	< 0.01
Carcinogenic VOC (class C1A or C1B)	< 5	< 5	-	-
Carcinogenic compounds (IARC)	-	-	< 0.005	< 0.002
Dissatisfaction with odor	-	-	< 15%	< 10%

Figura 3.17: Definizione di low e very low polluting building nelle due norme

Anche per quanto riguarda il calcolo del tasso di ventilazione necessario per assicurare un livello di qualità dell'aria interna accettabile, le due norme presentano un approccio diverso. Difatti facendo riferimento ad esempio al metodo sulla qualità dell'aria percepita, le due norme prescrivono valori differenti per i tassi di ventilazione necessari per diluire le emissioni date dagli occupanti e per i tassi necessari per diluire le emissioni dell'edificio.

Standard		q_p ($\text{l}/\text{s} \cdot \text{person}$)			
		Category I	Category II	Category III	Category IV
ISO 17772, EN 16798	adapted ^a	3.5	2.5	1.5	1
EN 15251	non-adapted (non-adapted)	10	7	4	2.5

Standard	q_b ($\text{l}/\text{s} \cdot \text{m}^2$)											
	Very low polluted				Low polluted				Non-low polluted			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
ISO 17772 ^a , EN 16798	0.5	0.35	0.3	0.25	1	0.7	0.4	0.3	2	1.4	0.8	0.6
EN 15251	0.5	0.35	0.3	-	1	0.7	0.4	-	2	1.4	0.8	-

Figura 3.18: Valori di progetto differenti tra le due norme in riferimento al metodo della qualità dell'aria percepita

Infine, mostriamo i livelli di CO₂ per le varie categorie, nella Figura 19.

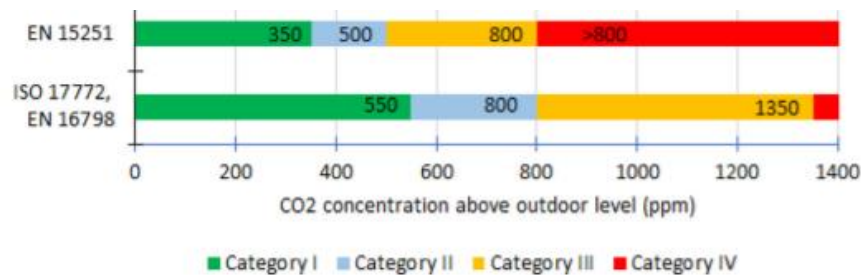


Figura 3.19: Range di CO₂ relativi alle varie categorie di comfort per le due norme

Notiamo che in questo caso è presente un'ambiguità poiché mentre, come per tutti gli altri parametri visti, la categoria 4 risulta illimitata nel caso della 15251 (valori maggiori di 800 ppm), nel caso della 16798 andando a leggere direttamente il testo della norma vediamo come il limite superiore della categoria 3 coincida con quello della categoria 4 (1350 ppm). Tale ambiguità può essere aperta a diverse interpretazioni, la nostra è stata che anche la categoria 4 nel caso della 16798 risulta essere illimitata accettando tutti i valori maggiori di 1350 ppm.

3.3 Aggiornamento ed Implementazione dello script in Python del Comfort Module

Una volta messe in evidenza le differenze tra le due norme, analizziamo le varie modifiche apportate allo script del Comfort Module fatte con il fine di aggiornarlo alla nuova norma entrata in vigore, la UNI EN 16798. Per la trattazione di quanto fatto ci riferiamo nei singoli paragrafi a specifiche parti di codice relative a file differenti per poi passare alla fine allo script principale da cui facciamo partire il programma ovvero "thermal comfort script desk".

1.f_Predictive

In questa parte di codice vengono introdotte la funzione 'pmv', la funzione 'mrt', la funzione 'mrt_angle_factors' e la funzione 'pmvranges'. La funzione 'pmv' viene impiegata per il calcolo degli indici di comfort PMV E PPD in accordo con la norma di riferimento la UNI EN ISO 7730. Le due funzioni successive calcolano entrambe la temperatura media radiante: la prima con l'ausilio di un globotermometro mentre la seconda con i fattori di vista in accordo con la ISO 7726. Queste prime tre non hanno subito modifiche perché non si riferiscono alle due norme in esame. Il discorso è diverso nel caso della funzione 'pmvranges' la quale calcola le zone di comfort relative al modello predittivo sul diagramma psicrometrico. Qui come già sappiamo dovremmo introdurre una nuova categoria ovvero la categoria 4. Questo è dovuto alla limitatezza del range di comfort della categoria 4 nella norma ora in vigore che necessita pertanto di una rappresentazione grafica in corrispondenza del diagramma psicrometrico. Evidenziamo perciò le parti modificate nella Figura 20.

```

if (category is 'A'):
    cat= 0.2
elif (category is 'B'):
    cat = 0.5
elif (category is 'C'):
    cat = 0.7

```



```

if (category is 'I'):
    cat= 0.2
elif (category is 'II'):
    cat = 0.5
elif (category is 'III'):
    cat = 0.7
elif (category is 'IV'):
    cat = 1.0

```

Figura 3.20: Aggiunta della categoria 4 e modifica della denominazione della categorie coerentemente con la UNI EN 16798 (prima si faceva riferimento alla ISO 7730)

2.f.Adaptive


All'interno di questo file è presente la funzione 'f_Adaptive' il cui scopo è quello di calcolare i range per la temperatura operativa di comfort in accordo con la norma 16798 (in realtà questa funzione effettua il calcolo anche in accordo a quanto prescritto nella normativa ASHRAE, ma in base alle nostre finalità quella specifica parte di codice non è stata presa in esame). Presentiamo subito nella Figura 21 i due codici, quello precedente e quello modificato, per poi analizzarne le differenze.

```

def f_Adaptive(t_out_rm_step, method, timestep):
    import numpy as np

    if (method is 'ISO15251'):
        TrmRange = np.arange(10,31,1)
        TrmLowerLimit=15
        TrmUpperLimit=30
        # Adaptive model equation coefficient given by the standard
        a=0.33
        b=18.2
        # Calculates the running mean temp for the design conditions
        Trm = np.mean(t_out_rm_step[:,0])
        # Calculate the optimal comfort temp for input data
        TOcomfOpt = [0]*len(t_out_rm_step[:,0])
        for index in range(len(t_out_rm_step[:,0])):
            if (t_out_rm_step[index,0]>TrmLowerLimit) and (t_out_rm_step[index,0]<TrmUpperLimit):
                TOcomfOpt[index]=a*t_out_rm_step[index,0]+b
            elif (t_out_rm_step[index,0]<TrmLowerLimit):
                TOcomfOpt[index]=a*TrmLowerLimit+b

```



```

def f_Adaptive(t_out_rm_step, method, timestep):
    import numpy as np

    if (method is 'EN16798'):
        TrmRange = np.arange(10,31,1)
        TrmLowerLimit=10
        TrmUpperLimit=30
        # Adaptive model equation coefficient given by the standard
        a=0.33
        b=18.8
        # Calculates the running mean temp for the design conditions
        Trm = np.mean(t_out_rm_step[:,0])
        # Calculate the optimal comfort temp for input data
        TOcomfOpt = [0]*len(t_out_rm_step[:,0])
        for index in range(len(t_out_rm_step[:,0])):
            if (t_out_rm_step[index,0]>TrmLowerLimit) and (t_out_rm_step[index,0]<TrmUpperLimit):
                TOcomfOpt[index]=a*t_out_rm_step[index,0]+b
            #elif (t_out_rm_step[index,0]<TrmLowerLimit):
            #TOcomfOpt[index]=a*TrmLowerLimit+b

```

Figura 3.21: Modifica della funzione f_Adaptive

È evidente innanzitutto la diversa denominazione del metodo perché precedentemente facevamo riferimento alla 15251 mentre ora alla 16798. In secondo luogo, è evidente la variazione del range di temperatura esterna, prima 15-30 ed ora 10-30. La funzione poi differenzia tra quando l'andamento della temperatura è lineare e quando questa si mantiene costante, tuttavia con la 16798 questa differenziazione non è più presente pertanto semplicemente annotiamo la parte relativa al tratto costante. In ultimo vediamo che la relazione lineare che lega la temperatura esterna e quella relativa

sarà caratterizzata da un certo coefficiente angolare ed un certo zero della funzione; notiamo pertanto che anche lo zero della funzione ha subito una modifica passando dal valore 18.2 al valore 18.8.

3.comfort_tool

In questo file sono presenti le funzioni 'iaq_tool' e la funzione 'thermal_tool'. La funzione 'iaq_tool' viene impiegata per il calcolo delle ore in cui l'edificio opera all'interno di una certa categoria di comfort in relazione alla qualità dell'aria interna. Le condizioni operative e quindi la categoria d'appartenenza vengono classificate in relazione alla concentrazione d'anidride carbonica CO₂ all'interno dell'ambiente. La funzione 'thermal_tool' opera l'analisi della sensibilità e della varianza dei parametri di output a seconda del modello impiegato ed in più valuta la percentuale di ore in cui l'ambiente opera in una certa categoria. Vediamo inizialmente quello abbiamo modificato nella parte di codice che fa riferimento al modello adattivo per poi riferirci al modello predittivo.

```
to_upper_limit_I=2
to_lower_limit_I=-2
to_upper_limit_II=3
to_lower_limit_II=-3
to_upper_limit_III=4
to_lower_limit_III=-4
```

```
to_upper_limit_I=2
to_lower_limit_I=-3
to_upper_limit_II=3
to_lower_limit_II=-4
to_upper_limit_III=4
to_lower_limit_III=-5
```

Figura 3.22: Modifica della parte relativa al modello adattivo della funzione thermal_tool

Vediamo che gli scostamenti della temperatura operativa ottimale, che mi danno i limiti superiori ed inferiori delle categorie di comfort, sono diversi; difatti, come detto, i limiti inferiori delle categorie di comfort sono stati shiftati verso il basso di un grado centigrado. In relazione invece al modello predittivo introduciamo le modifiche effettuate attraverso la figura successiva.

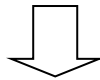
```
# Comfort zones and design conditions
t_rh_comf_a = predictive.pmvranges(tr_ref, vel_ref, clo_ref, met_ref, 'A')
t_rh_comf_b = predictive.pmvranges(tr_ref, vel_ref, clo_ref, met_ref, 'B')
t_rh_comf_c = predictive.pmvranges(tr_ref, vel_ref, clo_ref, met_ref, 'C')
```

```
# Comfort zones and design conditions
t_rh_comf_a = predictive.pmvranges(tr_ref, vel_ref, clo_ref, met_ref, 'I')
t_rh_comf_b = predictive.pmvranges(tr_ref, vel_ref, clo_ref, met_ref, 'II')
t_rh_comf_c = predictive.pmvranges(tr_ref, vel_ref, clo_ref, met_ref, 'III')
t_rh_comf_d = predictive.pmvranges(tr_ref, vel_ref, clo_ref, met_ref, 'IV')
```

```

pmv_upper_limit_I = 0.2
pmv_lower_limit_I = -0.2
pmv_upper_limit_II = 0.5
pmv_lower_limit_II = -0.5
pmv_upper_limit_III = 0.7
pmv_lower_limit_III = -0.7
hours=[0] * len(pmv_serie_h)
for index in range(len(pmv_serie_h)):
    if ((pmv_serie_h[index]>pmv_lower_limit_I) and (pmv_serie_h[index]<=pmv_upper_limit_I)):
        hours[index] = 1
    elif ((pmv_serie_h[index]>pmv_lower_limit_III) and (pmv_serie_h[index]<=pmv_upper_limit_III)):
        hours[index] = 2
    elif ((pmv_serie_h[index]>pmv_lower_limit_III) and (pmv_serie_h[index]<=pmv_upper_limit_III)):
        hours[index] = 3
    else:
        hours[index] = 4
cat_hours = {x:hours.count(x) for x in hours} #Attenzione verificare cosa succede se non ci sono ore per una categoria
periods = np.array(list(cat_hours.values()))/len(hours)*100
if (cat_hours.get(1)!= None):
    period_catI = cat_hours.get(1)/len(hours)*100
else:
    period_catI = 0
if (cat_hours.get(2)!= None):
    period_catII = cat_hours.get(2)/len(hours)*100
else:
    period_catII = 0
if (cat_hours.get(3)!= None):
    period_catIII = cat_hours.get(3)/len(hours)*100
else:
    period_catIII = 0
if (cat_hours.get(4)!= None):
    period_unconf = cat_hours.get(4)/len(hours)*100
else:
    period_unconf = 0
periods = [period_catI, period_catII, period_catIII, period_unconf]
return pmv_tot_mean, pmv_tot_std, ta_ref, rh_ref, ta_unc, t_rh_conf_a, t_rh_conf_b, t_rh_conf_c, sens_pmv, periods

```



```

pmv_upper_limit_I = 0.2
pmv_lower_limit_I = -0.2
pmv_upper_limit_II = 0.5
pmv_lower_limit_II = -0.5
pmv_upper_limit_III = 0.7
pmv_lower_limit_III = -0.7
pmv_upper_limit_IV = 1.0
pmv_lower_limit_IV = -1.0
hours=[0] * len(pmv_serie_h)
for index in range(len(pmv_serie_h)):
    if ((pmv_serie_h[index]>pmv_lower_limit_I) and (pmv_serie_h[index]<=pmv_upper_limit_I)):
        hours[index] = 1
    elif ((pmv_serie_h[index]>pmv_lower_limit_II) and (pmv_serie_h[index]<=pmv_upper_limit_II)):
        hours[index] = 2
    elif ((pmv_serie_h[index]>pmv_lower_limit_III) and (pmv_serie_h[index]<=pmv_upper_limit_III)):
        hours[index] = 3
    elif ((pmv_serie_h[index]>pmv_lower_limit_IV) and (pmv_serie_h[index]<=pmv_upper_limit_IV)):
        hours[index] = 4
    else:
        hours[index] = 5 #aggiunto OutOfCategory GR
cat_hours = {x:hours.count(x) for x in hours} #Attenzione verificare cosa succede se non ci sono ore per una categoria
periods = np.array(list(cat_hours.values()))/len(hours)*100
if (cat_hours.get(1)!= None):
    period_catI = cat_hours.get(1)/len(hours)*100
else:
    period_catI = 0
if (cat_hours.get(2)!= None):
    period_catII = cat_hours.get(2)/len(hours)*100
else:
    period_catII = 0
if (cat_hours.get(3)!= None):
    period_catIII = cat_hours.get(3)/len(hours)*100
else:
    period_catIII = 0
if (cat_hours.get(4)!= None):
    period_catIV = cat_hours.get(4)/len(hours)*100
else:
    period_catIV = 0
if (cat_hours.get(5)!= None):
    period_Out = cat_hours.get(5)/len(hours)*100
else:
    period_Out = 0
periods = [period_catI, period_catII, period_catIII, period_catIV, period_Out]
return pmv_tot_mean, pmv_tot_std, ta_ref, rh_ref, ta_unc, t_rh_conf_a, t_rh_conf_b, t_rh_conf_c, t_rh_conf_d, sens_pmv, periods

```

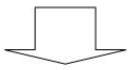
Figura 3.23: Modifica della parte relativa al modello predittivo della thermal_tool

Vediamo che, dovendo ora considerare anche la presenza della categoria 4, abbiamo aggiunto una variabile relativa alla rappresentazione delle zone di comfort, come rappresentato nella figura in alto. Dopo aver incluso gli estremi della categoria 4, ci accorgiamo di un problema ovvero del fatto che, essendo ora la categoria 4 caratterizzata da un range limitato di valori del PMV, non stiamo considerando minimamente le condizioni operative caratterizzate da PMV maggiori di 1 o minore di -1. Per cui in questo contesto introduciamo una nuova categoria chiamata “OUT OF CATEGORY” che raccoglie appunto tutte le condizioni operativa al di fuori delle categorie di comfort della norma 16798. Questo significa quindi che la lista ‘periods’ che raccoglie la percentuale delle ore in cui l’edificio si trova in una determinata categoria e che prima era caratterizzata da 4 valori (uno per ogni categoria di comfort), adesso sarà composta da 5 elementi con l’aggiunta dell’OUT OF CATEGORY.

4.KPIcal

La funzione ‘KPIcal’ calcola appunto il KPI dell’edificio ovvero il Key Performance Indicator. Il calcolo di tali indicatori come abbiamo detto si basa sulla percentuale di ore all’interno di una certa categoria.

Tuttavia, il problema risiede nel fatto che tale funzione precedentemente aveva come input, in entrambi i casi, una lista di 4 elementi mentre ora avrò input diversi a seconda del metodo scelto. La soluzione che abbiamo adottato è stata quella di introdurre un ulteriore input nella funzione KPIcal che è appunto il tipo di modello utilizzato. Fondamentalmente quello che abbiamo fatto è stato inserire il codice della funzione precedente nel caso in cui il modello scelto fosse adattivo, mentre nel caso predittivo abbiamo implementato la funzione precedente in modo tale che questa possa ricevere come input una lista di 5 elementi. Il risultato di tale implementazione è rappresentato nella Figura 24.



```
def KPIcal (periods):
    import numpy as np
    POR_I = sum(periods[1:])
    POR_II = sum(periods[2:])
    POR_III = sum(periods[3:])
    por_limits = [-5, 0]
    scores = [0, 100]
    KPI_I = np.round(np.interp(-POR_I, por_limits, scores), 1)
    KPI_II = np.round(np.interp(-POR_II, por_limits, scores), 1)
    KPI_III = np.round(np.interp(-POR_III, por_limits, scores), 1)
    KPIS = [KPI_I, KPI_II, KPI_III]
    return KPIS

def KPIcal (periods,model):
    import numpy as np
    if model is 'Adaptive':
        POR_I = sum(periods[1:])
        POR_II = sum(periods[2:])
        POR_III = sum(periods[3:])
        por_limits = [-5, 0]
        scores = [0, 100]
        KPI_I = np.round(np.interp(-POR_I, por_limits, scores), 1)
        KPI_II = np.round(np.interp(-POR_II, por_limits, scores), 1)
        KPI_III = np.round(np.interp(-POR_III, por_limits, scores), 1)
        KPIS = [KPI_I, KPI_II, KPI_III]
    if model is 'Predictive':
        POR_I = sum(periods[1:])
        POR_II = sum(periods[2:])
        POR_III = sum(periods[3:])
        POR_IV = sum(periods[4:])
        por_limits = [-5, 0]
        scores = [0, 100]
        KPI_I = np.round(np.interp(-POR_I, por_limits, scores), 1)
        KPI_II = np.round(np.interp(-POR_II, por_limits, scores), 1)
        KPI_III = np.round(np.interp(-POR_III, por_limits, scores), 1)
        KPI_IV = np.round(np.interp(-POR_IV, por_limits, scores), 1)
        KPIS = [KPI_I, KPI_II, KPI_III, KPI_IV]
    return KPIS
```

Figura 3.24: Implementazione della funzione KPIcal

5. psychroplot e comfort_plot

Questi due codici racchiudono le funzioni necessarie per la rappresentazione, attraverso l'importazione della libreria matplotlib, dei risultati delle funzioni precedenti attraverso delle zone di comfort sul diagramma psicrometrico (funzione 'psychroplot') e in un piano temperatura esterna-temperatura operativa (funzione 'adaptive plot'). La parte di aggiornamento ha riguardato sostanzialmente l'aggiunta di variabili e l'aggiornamento degli input relativi alle diverse condizioni prescritte nella UNI EN 16798 e all'aggiunta della categoria "OUT OF CATEGORY".

6. thermal comfort script_desk

Questa parte di codice rappresenta quella principale da cui facciamo partire il programma. Come le funzioni precedenti, la modifica ha riguardato semplicemente l'aggiunta di variabili e degli input in relazione a quanto detto precedentemente. La parte interessante di questo file è rappresentata piuttosto dal confronto tra gli output del modulo di comfort prima e dopo l'aggiornamento. Notiamo per quanto riguarda l'approccio predittivo l'aggiunta della categoria 4 sul diagramma psicrometrico.

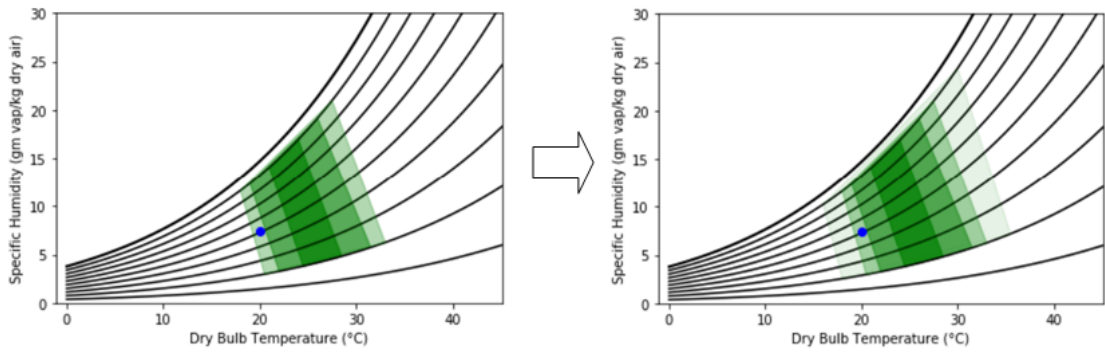


Figura 3.25: Confronto tra la rappresentazione delle zone di comfort sul diagramma psicrometrico prima e dopo l'aggiornamento

Per quanto riguarda il modello adattivo, le zone di comfort vengono ad assumere un profilo del tipo mostrato in Figura 26, con andamento sempre lineare dei limiti inferiori i quali sono anche shiftati di un grado verso il basso.

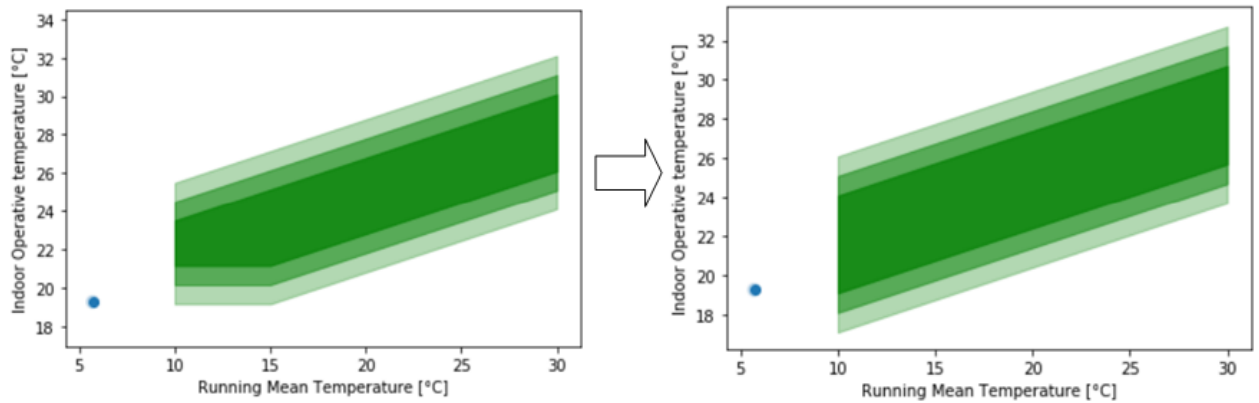


Figura 3.26: Confronto tra la rappresentazione delle zone di comfort nel metodo adattivo nelle due differenti norme

Infine valutiamo la rappresentazione del KPI e della percentuale di tempo sul totale in cui l'ambiente in esame si trova in una certa categoria di comfort o nell' "OUT OF CATEGORY".

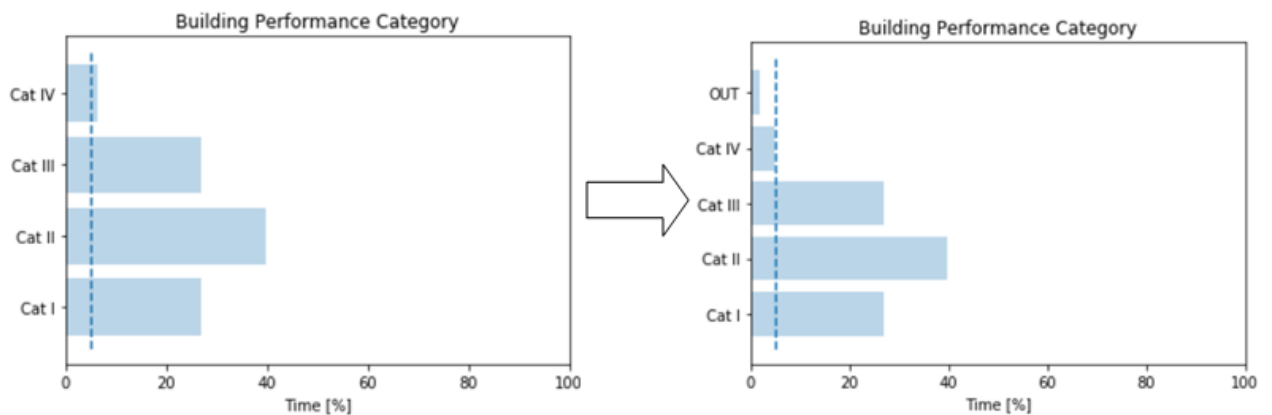


Figura 3.27: Rappresentazione della percentuale di tempo in una determinata categoria includendo l' "OUT OF CATEGORY"

È evidente, per come abbiamo definito il concetto di “OUT OF CATEGORY”, che una percentuale del tempo che prima ricadeva nella categoria 4, adesso fa parte della categoria OUT. Infatti si vede come, facendo il confronto, l’unica barra ad aver subito una diminuzione, è quella relativa alla categoria 4 che ovviamente sarà diminuita proporzionalmente all’estensione della categoria OUT.

Capitolo 4. Comfort Eye e WELL Standard

Quest'ultima parte della trattazione si concentra sulla valutazione di un eventuale impiego del sensore Comfort Eye nel contesto di una certificazione WELL. In particolare, andremo ad analizzare i Concept Air, Light e Comfort poiché sono gli unici per cui ha senso l'utilizzo di un sensore come il Comfort Eye, quindi escludiamo dall'analisi i Concept Water, Fitness, Mind e Nourishment. Quello che vogliamo conoscere nello specifico è se il Comfort Eye può essere utilizzato per verificare alcune Features relative ai Concept di cui sopra. I risultati di tale indagine per ogni Concept verranno illustrati in una tabella dove identificheremo se la Feature può essere verificata, se questa può essere verificata in parte ovvero se non tutte le Parts corrispondenti alla specifica Feature possono essere verificate oppure se la Feature non può essere minimamente verificata attraverso il Comfort Eye.

4.1 Concept AIR

Features	Verifica tutte le Parts	Verifica parzialmente la Features	Non Verifica la Features	Note
1. Air Quality Standards		✓		Il sensore rileva le concentrazioni di PM ed il TVOC, ma non le concentrazioni di Formaldeide, O ₃ , CO e Radon
2. Smoking Ban			✓	
3. Ventilation Effectiveness		✓		Riesce a valutare l'efficienza della ventilazione attraverso il livello di CO ₂ , ma non riesce a valutare le parts relative al sistema HVAC ed al progetto del sistema di ventilazione
4. VOC Reduction		✓		Questa Features si riferisce ai materiali utilizzati nell'edificio ed alle loro emissioni, il sensore rilevando il TVOC può essere utile ma non verifica la Feature nella sua interezza.
5. Air Filtration		✓		Riesce a rilevare la concentrazione di Particolato e quindi una delle condizioni della Parts 2
6. Microbe and Mold Control			✓	
7. Construction Pollution Management			✓	
8. Healthy Entrance			✓	
9. Cleaning Protocol			✓	
10. Pesticide Management			✓	

11.Fundamental Material		✓	
12. Moisture Management			✓
13.Air Flush	✓		Non riesce a rilevare i volumi d'aria in ingresso, ma la condizioni ausiliarie sono che tale flusso avvenga al massimo 15°C ed un'umidità relativa del 60%, che posso misurare
14.Air Infiltration Management			✓
15.Increased Ventilation			✓
16.Humidity Control	✓		
17.Direct Source Ventilation			✓
18. Air Quality Monitoring and Feedback	✓		Alcuni dei punti di forza del Comfort Eye sono appunto la rilevazione ed il monitoraggio per lunghi periodi, comunque facendo riferimento questa Features alla Features 1, non può essere completamente verificata
19. Operable Windows	✓		Ovviamente il Comfort Eye non è capace di rilevare la presenza di finestre, tuttavia nelle varie Parts viene anche richiesta la rilevazione della qualità dell'aria esterna, cosa che potrebbe essere eventualmente svolta dal sensore
20. Outdoor Air Systems			✓
21. Displacement Ventilation			✓
22. Pest Control			✓
23. Advanced Air Purification			✓
24. Combustion Minimization			✓
25. Toxic Material Reduction			✓
26. Enhanced Material Safety			✓
27. Antimicrobial Activity for Surfaces			✓
28. Cleanable Environment			✓
29. Cleaning Equipment			✓

4.2 Concept LIGHT

Features	Verifica tutte le Parts	Verifica parzialmente la Features	Non Verifica la Features	Note
53. Visual Lighting Design		✓		La Feature richiede specifici valori di illuminamento che possono essere verificati attraverso il sensore, tuttavia viene anche richiesta la valutazione della posizione delle sorgenti luminose per un corretto lighting design
54. Circadian Lighting Design			✓	
55. Electric Light Glare Control			✓	
56. Solar Glare Control			✓	
57. Low-glare Workstation Design			✓	
58. Color Quality			✓	
59. Surface Design			✓	
60. Automated Shading and Dimming Controls			✓	
61. Right to Light			✓	
62. Daylight Modeling			✓	
63. Daylighting Fenestration			✓	

4.3 Concept COMFORT

Features	Verifica tutte le Parts	Verifica parzialmente la Features	Non Verifica la Features	Note
72. Accessible Design			✓	
73. Ergonomics: Visual and Physical			✓	
74. Exterior Noise Intrusion			✓	
75. Internally Generated Noise			✓	
76. Thermal Comfort	✓			
77. Olfactory Comfort			✓	
78. Reverberation Time			✓	
79. Sound Masking			✓	
80. Sound Reducing Surfaces			✓	
81. Sound Barriers			✓	
82. Individual Thermal Control			✓	
83. Radiant Thermal Comfort		✓		Il Comfort Eye riesce a verificare che le condizioni siano rispettate, ma non può verificare la presenza di sistemi di raffreddamento o riscaldamento di tipo elettrico o idronico

4.4 Risultati dello studio dell'applicabilità del Comfort Eye in una Certificazione WELL

Come abbiamo evidenziato nelle tabelle precedenti, l'impiego del Comfort Eye in una certificazione di tipo WELL è abbastanza limitato. Questo perché fondamentalmente i punti di forza del Comfort Eye come la non invasività e la possibilità di effettuare rilevazioni per lunghi periodi di tempo in maniera accurata, non si coniugano perfettamente con le finalità di una certificazione di questo tipo. Infatti, come detto, la WELL Standard, essendo il risultato di anni di studi ed utilizzando un approccio multidisciplinare ed omnicomprensivo, garantisce livelli di qualità dell'ambiente interno molto elevati, tant'è che solo pochi edifici nel mondo possono vantare di possedere una certificazione WELL. Tale garanzia di qualità si traduce in una serie di prescrizioni, da parte della suddetta norma, molto specifiche che non possono essere completamente verificate solo con l'ausilio del Comfort Eye. Difatti facendo riferimento al Concept Air in cui il Comfort Eye può essere impiegato maggiormente, comunque questo non riesce a verificare più di una Features. Infatti, è vero che il nodo delle misurazioni ambientali più quello aggiuntivo, sviluppato recentemente, permettono di rilevare il TVOC, la concentrazione di CO₂, l'umidità relativa dell'aria e la concentrazione di particolato; ma nelle varie Features viene richiesta la rilevazione di specifiche che tale sensore non è capace di misurare come: il flusso d'aria dall'esterno, le concentrazioni di Radon, Ozono o Formaldeide. Questo discorso è ancora più evidente nei Concept successivi. Infatti, nel Concept Light viene richiesta la verifica di specifiche come la coerenza dell'illuminazione con il ritmo circadiano, il controllo delle sorgenti luminose, la resa cromatica; tuttavia il Comfort Eye è in grado di rilevare solo l'illuminamento pertanto il suo impiego per la verifica di Features di questo tipo è alquanto limitato. Per il Concept Comfort vediamo che il testo della certificazione WELL si concentra piuttosto che sul comfort termico (a cui dedica tre Features su dodici), sul comfort olfattivo ed acustico. Tuttavia, sappiamo che il Comfort Eye, anche per la diversa natura delle rilevazioni sul campo sonoro, non presenta nodi per la determinazione del comfort acustico. L'inserimento di uno o più sensori per rilevazioni del campo acustico (che non sono mai a lungo termine poiché, a differenza dell'ambiente termico, queste non dipendono dalla stagione di riferimento), così come l'ausilio di sensori per la rilevazione della concentrazione di specifici componenti, può determinare un notevole aumento della Features verificate dalla nostra catena di misura.

Conclusioni

Finalità di questa trattazione sono: l'analisi dello stato dell'arte del problema Comfort Indoor, passando dalla nascita della teoria del comfort fino ad arrivare agli sviluppi attuali dati dallo Standard WELL, l'aggiornamento dello script del Comfort Module alla nuova norma vigente ovvero la UNI EN 16798 ed il confronto delle funzionalità del Comfort Eye con le prescrizioni presenti nella certificazione WELL, analizzandone così i limiti di applicabilità. Abbiamo visto che il processo di aggiornamento del Comfort Module ha condotto a tutta una serie di modifiche tra cui la rappresentazione della categoria 4 sul diagramma psicrometrico seguendo il metodo predittivo, la modifica dei limiti inferiori delle zone di comfort nel modello adattivo che a sua volta ha portato allo shift verso il basso di queste di un grado ed all'introduzione della linearità anche nel tratto iniziale tra i 10°C ed i 15°C. Oltre a questo abbiamo anche introdotto la nuova categoria denominata "OUT OF CATEGORY" in modo tale, data la limitatezza del range del PMV nella categoria 4 seguendo il modello predittivo nella UNI EN 16798, di considerare anche le condizioni operative al di fuori delle quattro categorie di comfort date dalla norma ora in vigore. Per quanto riguarda invece la WELL Standard e l'impiego al suo interno del Comfort Eye, abbiamo constatato come questo non si coniughi al meglio con una certificazione di questo tipo benché presenti notevoli punti di forza come la non invasività e la possibilità di effettuare rilevazioni in maniera accurata, anche a lungo termine, in modo da valutare l'influenza delle stagioni sulle grandezze misurate. Infatti, ora sappiamo come la WELL Standard, rappresentando l'ultima frontiera dell'innovazione e della ricerca nell'ambito di wellbeing nella progettazione di edifici, garantisca spazi ed ambienti con elevato livello di qualità e per farlo è ovviamente caratterizzata da prescrizioni altamente specifiche che non possono essere verificate in toto dal Comfort Eye, o da un altro sensore preso singolarmente. Da questo punto di vista piuttosto che aggiornare questo sensore, ha più senso affiancarlo ad altri sensori più specifici come ad esempio sensori per la rilevazione di specifici composti come Ozono O₃, Radon, Monossido di Carbonio CO; oppure sensori per la rilevazione del campo sonoro e la determinazione del rumore generato esternamente o internamente. Attraverso questo semplice accorgimento, quindi con un sistema di sensori costituito dal Comfort Eye ed altri appena citati, riusciremmo a verificare un numero molto maggiore di Features dei Concept presi in esame ovvero: Air, Light e Comfort. Per concludere, il contributo dato da questa trattazione al problema comfort è stato quello di analizzare, studiare ed aggiornare due strumenti di fondamentale importanza, a disposizione del Laboratorio di Misure della nostra università, per la valutazione del comfort e delle prestazioni energetiche dell'edificio, come il Comfort Module ed il Comfort Eye. Il risultato è stato quindi un lungo lavoro di ricerca e studio del problema comfort che ha portato all'aggiornamento ed implementazione del Comfort Module ed alla valutazione dell'applicazione del Comfort Eye nel contesto di una normativa come il WELL Standard. La portata dei risultati ottenuti si riflette sul fatto che tali strumenti possono essere impiegati congiuntamente per una valutazione complessiva del comfort e delle prestazioni energetiche, che come abbiamo avuto modo di dire nei capitoli precedenti ha notevoli implicazioni sull'economia dell'edificio.

Bibliografia

- [1] (2008). *UNI EN 15251:2008 Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.*
- [2] B. W. (2007). The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings. *Energy and Buildings*, 39(7), 740–749. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.011>
- [3] Farnham, B., Tokyo, S., Boston, B., Sebastopol, F., & Beijing, T. (n.d.). *Mark Lutz Learning Python FIFTH EDITION.*
- [4] Khovalyg, D., Kazanci, O. B., Halvorsen, H., Gundlach, I., Bahnfleth, W. P., Toftum, J., & Olesen, B. W. (2020). Critical review of standards for indoor thermal environment and air quality. *Energy and Buildings*, 213, 109819. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109819>
- [5] Khovalyg, D., Kazanci, O. B., Halvorsen, H., Gundlach, I., Bahnfleth, W. P., Toftum, J., & Olesen, B. W. (2020). Critical review of standards for indoor thermal environment and air quality. *Energy and Buildings*, 213, 109819. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109819>
- [6] Lee, W. L. (2012). Benchmarking energy use of building environmental assessment schemes. *Energy and Buildings*, 45, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.024>
- [7] US Green Building Council. (2016). *LEED v4 for building design and construction*. 147. <https://www.usgbc.org/resources/leed-v4-building-design-and-construction-current-version>
- [8] *The WELL Standard*. (2019).
- [9] Arnesano, M., Claudi, L., Naspi, F., Seri, F., Revel, G. M., Orazio, D., & Stazi, F. (2020). *Deliverable D4.3 : Occupants Perspective in the Collaborative Design : Comfort and Behavioural Models.*
- [10] Lee, W. L., & Burnett, J. (2008). Benchmarking energy use assessment of HK-BEAM, BREEAM and LEED. *Building and Environment*, 43(11), 1882–1891. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.11.007>
- [11] Heinzerling, D., Schiavon, S., Webster, T., & Arens, E. (2013). Indoor environmental quality assessment models: A literature review and a proposed weighting and classification scheme. *Building and Environment*, 70, 210–222. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.027>

Ringraziamenti

Alla fine di questo scritto e anche di questo percorso, volevo sinceramente ringraziare alcune persone che mi hanno permesso di essere qui a scrivere queste righe. In primis, il Prof. Gian Marco Revel per avermi concesso l'opportunità di lavorare con lui e la sua equipe. Ringrazio anche l' Ing. Chiara Crisanti per la sua (veramente) infinita pazienza nel supportarmi nel lungo percorso che ha portato alla stesura di questa tesi. Ringrazio la mia famiglia ed in particolare le donne ovvero mia madre Daniela, mia zia Lorena e mia nonna Marisa per essermi sempre state vicine in ogni singolo momento che ha portato a questo giorno. Volevo poi ringraziare tutti gli amici, vecchi e nuovi, che hanno fatto parte di questo percorso ricco di insidie e difficoltà ma anche di soddisfazioni e scoperte. Ringrazio in particolare: Pierluigi per tutto il sonno che gli ho rubato; ringrazio Ludovico per essere il mio "amicone"; ringrazio Dionino per aver condiviso con me questo percorso ed anche altro che però non posso riferire in questa sede; ringrazio infine Stefano per tutto l'aiuto datomi in questi anni e senza il quale molto probabilmente non sarei sopravvissuto. Ringrazio poi il mio "tutor" Caterina per avermi tenuto per mano in quest'ultimo periodo. Per finire, ultimo ma non ultimo, ringrazio infinitamente il Grandissimo Michele Pio Cannarozzi per avermi insegnato in questi anni una nuova lingua, a me sconosciuta fino a poco fa, il Pugliese.

Ancona, Ottobre 2020

Gianmarco Rosati