



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

*DIPARTIMENTO DI
SCIENZE E INGEGNERIA DELLA MATERIA, DELL'AMBIENTE ED
URBANISTICA (SIMAU)*

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE

*INPUT PER LA GESTIONE DINAMICA
DI UN SISTEMA HVAC*

*INPUT FOR THE DYNAMIC MANAGEMENT
OF A SYSTEM HVAC*

RELATORE:

Prof. Francesca Stazi

CORELATORE:

Prof. Costanzo Di Perna

TESI DI LAUREA DI:

Lorenzo Virgilio

ANNO ACCADEMICO
2019/2020

Sommario

1.	<i>Introduzione</i>	5
2.	<i>Comfort termico</i>	7
2.1.	Metodo di Fanger	7
2.2.	Metodo adattivo.....	11
2.3.	ASHRAE 55 – 2010 valutazione comfort termico.....	15
3.	<i>Thermal sensation vote TSV</i>	18
4.	<i>Il caso studio</i>	21
4.1.	Aspetti generali.....	21
4.2.	Area di prova	23
4.3.	Sistema costruttivo.....	25
5.	<i>Fasi, strumenti e metodi TSV</i>	26
5.1.	Tipo di studio, obiettivi e fasi	26
5.2.	Parametri monitorati.....	28
5.3.	Strumentazione	29
5.3.1.	Optical Pulse Sensor.....	29
5.3.2.	GSR +	31
5.3.3.	Centralina Dantec	32
5.4.	Metodo di analisi statistico.....	32
5.4.1.	Regressione multipla lineare.....	33
5.4.2.	Indice di determinazione lineare	34
6.	<i>Risultati sperimentali TSV</i>	35
7.	<i>Fasi, strumenti e metodi - occupazione dinamica</i>	40
7.1.	Tipo di studio, obiettivi e fasi	40
7.2.	Parametri monitorati.....	42
8.	<i>Prestazione energetica di un edificio</i>	42

8.1.	Requisiti energetici minimi	43
8.2.	Trasmittanza termica involucro	46
8.2.1.	Prestazione involucro opaco – Edificio standard	48
8.2.2.	Prestazione involucro opaco – Edificio fortemente isolato	50
8.2.3.	Prestazione involucro trasparente	52
8.2.4.	Caratteristiche involucro trasparente	54
8.2.5.	Ponti termici.....	57
9.	<i>Modellazione</i>	58
9.1.	Introduzione DesignBuilder	58
9.2.	Impostazione modello	60
9.3.	Profili occupazionali.....	62
9.4.	Definizione parametri di calcolo	64
9.5.	Metodologia di calcolo	66
9.6.	Definizione parametri di simulazione	68
10.	<i>Risultati simulazioni energetiche – comfort</i>	69
10.1.	Risultati edificio standard	69
10.1.1.	Occupazione standard	69
10.1.2.	Set-point 20°C – 26°C.....	69
10.1.3.	Set-point 21°C – 25°C.....	71
10.1.4.	Set-point 22°C – 24°C.....	73
10.1.5.	Occupazione dinamica	75
10.1.6.	Set-point 20°C – 26°C.....	75
10.1.7.	Set-point 21°C – 25°C.....	76
10.1.8.	Set-point 22°C – 24°C.....	77
10.1.9.	Confronto edificio standard.....	79
10.2.	Risultati edificio fortemente isolato	82
10.2.1.	Occupazione standard	83
10.2.2.	Set-point 20°C – 26°C.....	83
10.2.3.	Set-point 21°C – 25°C.....	84
10.2.4.	Set-point 22°C – 24°C.....	85
10.2.5.	Occupazione dinamica	86

10.2.6.	Set-point 20°C – 26°C.....	87
10.2.7.	Set-point 21°C – 25°C.....	88
10.2.8.	Set-point 22°C – 24°C.....	89
10.2.9.	Confronto – edificio fortemente isolato	90
11.	<i>Conclusioni</i>	94
	<i>Bibliografia</i>	96
	<i>Storiografia</i>	97

1. Introduzione

Nella società moderna conciliare comfort abitativo ed efficienza energetica è la vera sfida dell'edilizia contemporanea, in quanto la formula energeticamente più efficiente può non coincidere con la soluzione più performante sotto il profilo del comfort e dell'estetica.

Poiché gli edifici sono responsabili del 40% del consumo globale di energia in Europa e influiscono sul consumo energetico a lungo termine, l'obiettivo a cui tendere, come indicato dalla Direttiva 2010/31/UE, sono gli edifici a energia quasi zero. Molti fattori possono concorrere alla realizzazione di questo grande potenziale di risparmio energetico, un potenziale ancora inespresso che abbraccia le nuove costruzioni e le ristrutturazioni, punto cruciale in quanto il patrimonio immobiliare esistente è in larga percentuale obsoleto. Dall'impianto di riscaldamento e condizionamento all'impiego di energia da fonti rinnovabili, dalla regolazione degli impianti alla qualità dell'aria interna, la buona progettazione tiene conto di tutti questi fattori, che cambiano in base alle condizioni climatiche locali.

Oltre alla progettazione tecnologica degli edifici, risulta rilevante nell'eccessivo consumo di energia, la regolazione dei sistemi di controllo automatico del riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC), i quali nella maggior parte casi sono basati su modelli semplificati tipici della pratica comune, invece che su effettivi parametri dell'utilizzo degli edifici.

Numerosi studi si sono susseguiti sul binomio risparmio energetico – comfort termico [1], dimostrando come il comfort termico non sia irraggiungibile senza un eccessivo dispendio energetico, specialmente attraverso l'utilizzo di modelli dinamici dell'occupazione e algoritmi predittivi della sensazione termica degli stessi.

La realizzazione di un algoritmo predittivo per la gestione automatizzata del sistema HVAC per la ricerca del comfort ambientale e conseguentemente del risparmio energetico, come già effettuata in condizioni estive [2], ha una rilevanza particolare per gli uffici, in cui i sistemi di climatizzazione risultano attivi in maniera continua dal lunedì al venerdì, ed il comfort ambientale ha un grosso impatto sulla produttività degli impiegati.

L'obiettivo della presente tesi è quindi di valutare l'effettiva possibilità di utilizzare come parametri per la gestione dinamica di un sistema HVAC, algoritmi predittivi basati sulla Thermal Sensation Vote e i profili di occupazione dinamica delle diverse zone climatiche degli edifici.

2. Comfort termico

In accordo con la UNI EN ISO 7730 il comfort termico è definito come “Condizione che esprime la soddisfazione con l’ambiente termico circostante. L’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”.

Il concetto di comfort non è meramente legato ad una evidenza scientifica. È piuttosto una preferenza personale/sociale/circostanziale. Inoltre, numerose sono le variabili che incidono sulla percezione del comfort:

- Variabili personali;
- Variabili locali;
- Variabili globali.

2.1. Metodo di Fanger

Il metodo del Fanger si basa sul bilancio energetico. Per tradurre il concetto di comfort in forma ingegneristica occorre interpretare il corpo umano come un sistema termodinamico che converte il cibo (inteso come se fosse un combustibile) in lavoro e calore, proprio come accade alle macchine termiche inanimate. Il surplus energetico non convertito in lavoro va disperso in ambiente mediante meccanismi di perdita di calore sensibile e latente.

Meccanismi di scambio termico sensibile:

- Radiante;

- Convettivo;
- Respirazione.

Meccanismi di scambio termico latente;

- Respirazione;
- Diffusione di vapore;
- Sudorazione.

$$S = M - (\pm W) \pm C \pm R \pm E$$

S = Potenza termica accumulata (o perduta) nell'organismo = derivata nel tempo dell'energia interna

M = Potenza sviluppata dall'attività metabolica;

W = Potenza dissipata per attività lavorativa;

C = Potenza termica scambiata per convezione (ca. 27%);

R = Potenza termica scambiata per irraggiamento (ca. 40%);

E = Potenza termica per evaporazione dell'acqua (ca. 30%);

K = Potenza termica scambiata per conduzione (ca. 3%).

La condizione necessaria (ma non sufficiente) su cui si basa il metodo Fanger per ottenere condizioni di comfort termoigrometrico è la condizione di omeotermia del corpo umano.

Il modello si basa su tre assunzioni fondamentali:

- 1) Utenti passivi: sono coloro che hanno basse o nulle possibilità di controllo sull'ambiente nel quale si trovano;

- 2) Si raggiungono gli stessi risultati per valori uguali delle sei variabili di input;
- 3) Il modello è stazionario: sono permesse solo piccole variazioni temporali dei parametri ambientali.

Con questo modello si raggiungono risultati molto prossimi alla realtà quando i valori non variano, ad esempio considerando un sistema riscaldato con utenti passivi che hanno un abbigliamento fisso. I risultati migliori sono stati ottenuti per applicazioni relative a uffici, che molto spesso, hanno un impianto di riscaldamento centralizzato, dove gli utenti hanno orari lavorativi ben definiti, postazioni fisse e talvolta anche un abbigliamento piuttosto standardizzato.

Per la realizzazione della sperimentazione sono stati effettuati test con 1300 soggetti, posti uno per volta all'interno della camera climatica in cui sono stati controllati i seguenti parametri:

- Velocità dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa, livelli di attività e il vestiario sono fissati di volta in volta;
- Giudizi verbali (voti) dei soggetti in una scala nominale composta da sette valori: molto freddo (-3), freddo (-2), leggermente freddo (-1), neutro (0), leggermente caldo (+1), caldo (+2), molto caldo (+3).
- La temperatura interna veniva variata fino ad annullare la percezione di caldo/freddo verso il microclima circostante.

L'obiettivo consiste nel determinare la temperatura ambientale ideale per ogni set di parametri ambientali in modo da delineare regole e correlazioni generali tra i parametri coinvolti.

Dall'attività di sperimentazione ne deriva l'equazione del comfort adottata nella ISO 7730:

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

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

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

Dai dati ottenuti sono stati definiti due indici di comfort complessivi:

- 1) Predicted mean vote (media voto prevista) PMV, definito da Fanger come “la differenza tra il calore interno prodotto e le perdite di calore verso l'ambiente attuale per un uomo, mantenendo i valori del comfort per la temperatura della pelle e per la sudorazione a livello di attività attuale”. Predice il voto del comfort attribuito da un considerevole gruppo di individui per un set definito di condizioni ambientali, di valori metabolici (W/mq met) e della resistenza termica degli indumenti (clo), definisce la percentuale di persone che si aspetta considerino accettabile l'ambiente circostante.
- 2) Percentage of people dissatisfied (percentuale prevista di insoddisfatti) PPD: definisce la percentuale di persone con voto fuori dal range del PMV -1 (leggermente fresco) a +1 (leggermente caldo)

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,003353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)}$$

CATEGORIA	PPD %	PMV
I	<6	-0,2 - + 0,2
II	<10	-0,5 - + ,5
III	<15	-0,7 - + 0,7

Tabella 1

Questo metodo sottostima la tolleranza termica delle persone, provoca un consumo eccessivi di energia e si basa su ipotesi molto restringenti.

2.2. Metodo adattivo

Il modello di comfort adattivo viene studiato negli anni 70 da J. F. Nicol e M. A. Humphreys e da R. J. deDear e G. S. Brager. In questo modello l'occupante di un edificio non è più semplicemente inteso come un soggetto passivo, così come appariva nel modello statico (Fanger PMV), ma come un agente attivo che interagisce a tutti i livelli con l'ambiente in cui soggiorna.

I punti di forza di questo modello sono legati al:

- Coinvolgimento di tutte le quattro sfere del comfort (ambiente termico, IAQ, illuminazione, acustica);
- Previsione di un metodo “ergonomico-energetico sinergico” come il risultato di informazioni pregresse in grado di ottimizzare algoritmi su studi sperimentali passati;

- Applicabilità alle diverse aspettative degli utenti in edifici sia con ventilazione meccanica controllata sia con ventilazione naturale;
- Attenzione rivolta sia ad edifici nuovi che esistenti;
- Offre informazioni necessarie per il calcolo energetico per i diversi criteri utilizzati per l'ambiente interno.

Gli utenti interagiscono attivamente con l'ambiente termico circostante, applicando misure di acclimatizzazione e controllo al fine di mantenere o ripristinare il loro soddisfacimento ambientale. Sono state definite 3 categorie di adattamento termico:

- 1) *Comportamentale*: individuali (riferiti all'abbigliamento, all'attività svolta, alla postura, all'assunzione di bevande calde o fredde, allo spostamento nella stanza) tecnologici (legati all'apertura/chiusura delle finestre o delle schermature) e culturali (ossia l'orario lavorativo e le pause);
- 2) *Fisiologico*: vasocostrizione / vasodilatazione che riduce o aumenta la temperatura della pelle e la dissipazione di energia;
- 3) *Psicologico*: legato strettamente ad esperienze passate, aspettative o alla percezione della possibilità di un controllo microclimatico.

Il modello adattivo si basa sull'ipotesi che il clima esterno influenzi il comfort interno, mentre la storia termica passata influenza le preferenze e le aspettative termiche degli occupanti. Viene messo così in relazione il comfort interno con la temperatura media esterna, considerandolo con coefficienti decrescenti fino a 30 giorni prima del giorno in questione.

$$T_{co} = aT_{out} + b$$

Dove T_{co} è la temperatura di comfort interno, T_{out} è la temperatura esterna, a è la percentuale di crescita reciproca e b è la temperatura minima accettabile.

Il modello adattivo introduce quindi algoritmi di controllo e di risposta che permettono di migliorare il livello di comfort termico degli occupanti e di ridurre il consumo di energia.

Ecco la correlazione secondo la EN 15251 – Allegato A.2:

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot (\theta_{ed-1} + \alpha\theta_{ed-2} + \alpha^2\theta_{ed-3} \dots)$$

Dove

θ_{rm} = temperatura media ricorrente per oggi

θ_{rm-1} = temperatura media ricorrente per ieri

θ_{ed-1} = temperatura giornaliera media esterna per ieri

α = costante compresa tra 0 e 1 (raccomandata 0,8)

Si ottiene una fascia di comfort per un periodo desiderato (ad esempio la stagione estiva, in assenza di climatizzazione meccanica), calcolata sommando e sottraendo alcuni gradi °C dalla curva della temperatura operativa ottimale.

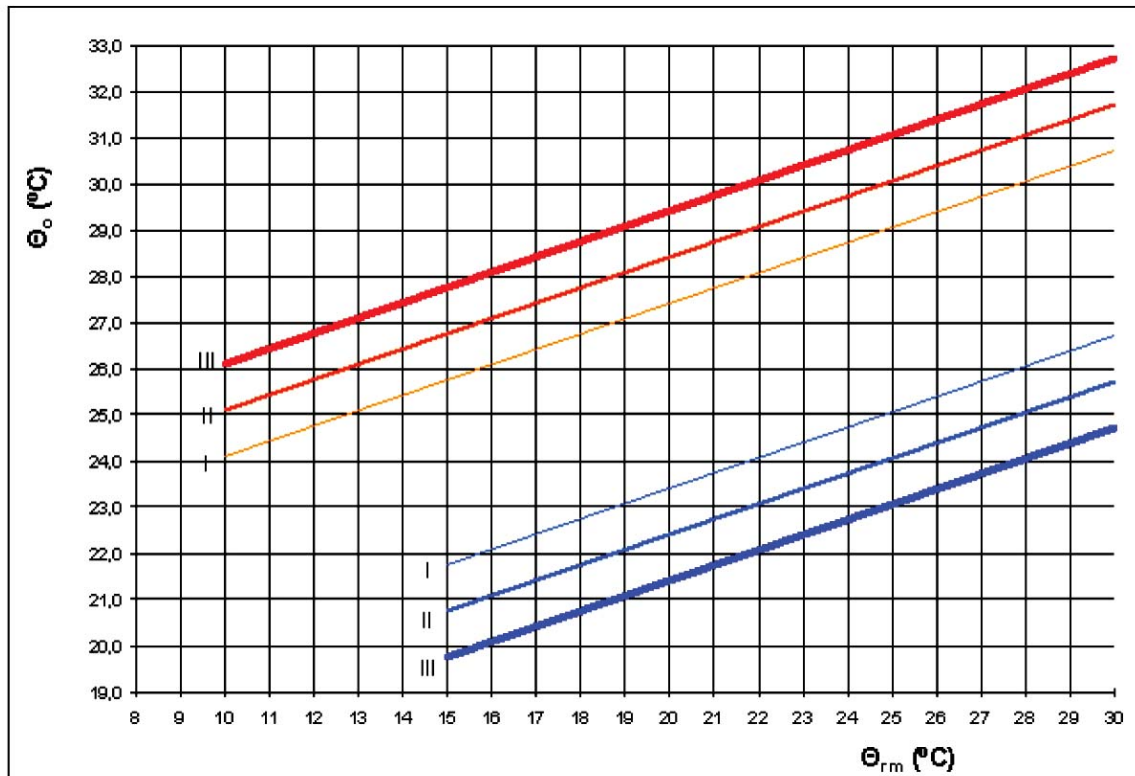


Figura 1

Categoria I	Limite superiore: $\theta_{i,max} = 0,33\theta_{rm} + 18,8 + 2$ Limite inferiore: $\theta_{i,min} = 0,33\theta_{rm} + 18,8 - 2$
Categoria II	Limite superiore: $\theta_{i,max} = 0,33\theta_{rm} + 18,8 + 3$ Limite inferiore: $\theta_{i,min} = 0,33\theta_{rm} + 18,8 - 3$
Categoria III	Limite superiore: $\theta_{i,max} = 0,33\theta_{rm} + 18,8 + 4$ Limite inferiore: $\theta_{i,min} = 0,33\theta_{rm} + 18,8 - 4$

Tabella 2

Alla base del modello di comfort adattivo c'è la convinzione che il soggetto, consciamente o inconsciamente, svolge un ruolo attivo nella creazione delle

condizioni termiche che preferisce e che, per raggiungere più facilmente la soddisfazione nei confronti del microclima, attua un processo di adattamento, definito come quel processo di graduale diminuzione delle reazioni individuali agli stimoli ambientali.

Il metodo adattivo dovrebbe essere preferito al metodo Fanger ogni qual volta si ha accesso ai sistemi di controllo ambientali, i soggetti siano impiegati in attività sedentarie con tasso metabolico 1 – 1,3 met e temperature medie tra i 10°C e i 33,5°C.

Il modello adattivo, generalmente, definisce temperature di comfort maggiori e più flessibili rispetto al modello di Fanger. Spesso la temperatura di comfort adattiva ottimale può essere raggiunta utilizzando strategie di raffrescamento passivo, come l'ombreggiamento delle finestre e la ventilazione notturna. In questi casi, il fabbisogno di raffrescamento si riduce praticamente a zero, e non è necessario (o quasi) un raffrescamento meccanico.

2.3. ASHRAE 55 – 2010 valutazione comfort termico

Lo scopo di questo standard è quello di specificare le combinazioni dei fattori ambientali termici interni e fattori personali che produrranno condizioni ambientali termiche accettabili per la maggior parte degli occupanti all'interno dello spazio.

Questo standard raccomanda una percentuale specifica di occupanti che costituisce accettabilità e valori dell'ambiente termico associati a questa percentuale.

Nella presente sperimentazione si è fatto riferimento al “metodo delle zone del grafico di comfort per tipici ambienti interni” al fine di valutare le ore di discomfort degli occupanti.

È consentito applicare il metodo agli spazi in cui gli occupanti hanno livelli di attività che determinano tassi metabolici compresi tra 1,0 e 1,3 e dove si sono indossati indumenti che forniscono un valore di isolamento termico tra 0,5 e 1,0 clo.

L'intervallo di temperature operative presentato nella Figura 2 è accettabile per l'80% degli occupanti. Questo si basa su un criterio di insoddisfazione del 10% per il benessere generale (corpo intero) basato sull'indice PMV-PPD, oltre a un'ulteriore insoddisfazione del 10% che può verificarsi in media a disagio termico locale (corpo parziale). La Figura 3 specifica la zona di comfort per ambienti che soddisfano i criteri di cui sopra e in cui le velocità dell'aria non sono superiori a 0,20 m/s. Sono mostrate due zone, una per un isolamento dovuto all'abbigliamento pari a 0,5 clo e una per 1,0 clo. Questi livelli di isolamento sono tipici degli indumenti indossati quando l'ambiente esterno risulta rispettivamente caldo e fresco. È consentito determinare l'intervallo di temperatura operativa consentito per i valori intermedi di isolamento degli indumenti mediante interpolazione lineare tra i limiti per 0,5 e 1,0 clo.

When applying this Graphic per Section 5.2.1.1, the following limitations apply:

- Applies to Operative Temperature only – cannot be applied based on dry bulb temperature alone. See Appendix C for acceptable approximations.
- Applies only when requirements of Sections 5.2.3 through 5.2.5.2 are met.

For other compliance paths, see Section 5.2.1.2 for the Computer Model Method and Section 5.3 for the Optional Method for Naturally Conditioned Spaces.

For further compliance requirements, see Sections 6 and 7.

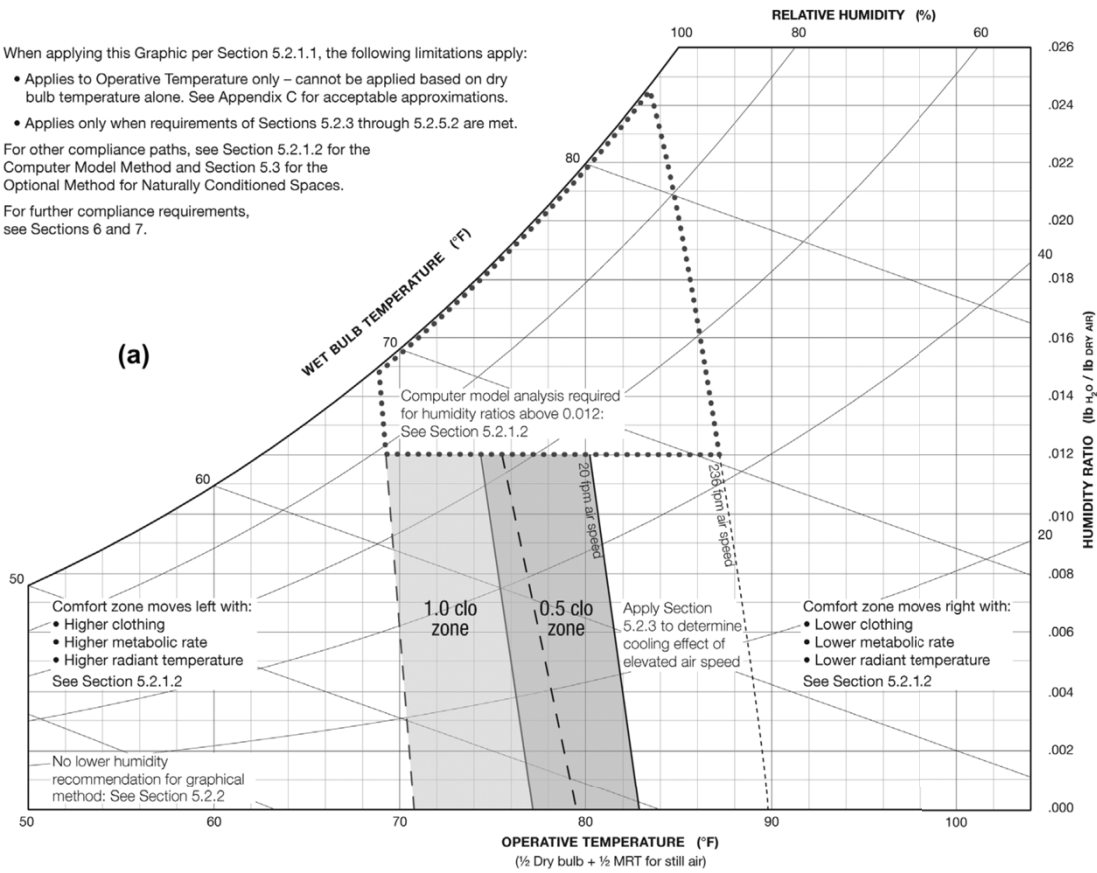


Figura 2

When applying this Graphic per Section 5.2.1.1, the following limitations apply:

- Applies to Operative Temperature only – cannot be applied based on dry bulb temperature alone. See Appendix C for acceptable approximations.
- Applies only when requirements of Sections 5.2.3 through 5.2.5.2 are met.

For other compliance paths, see Section 5.2.1.2 for the Computer Model Method and Section 5.3 for the Optional Method for Naturally Conditioned Spaces.

For further compliance requirements, see Sections 6 and 7.

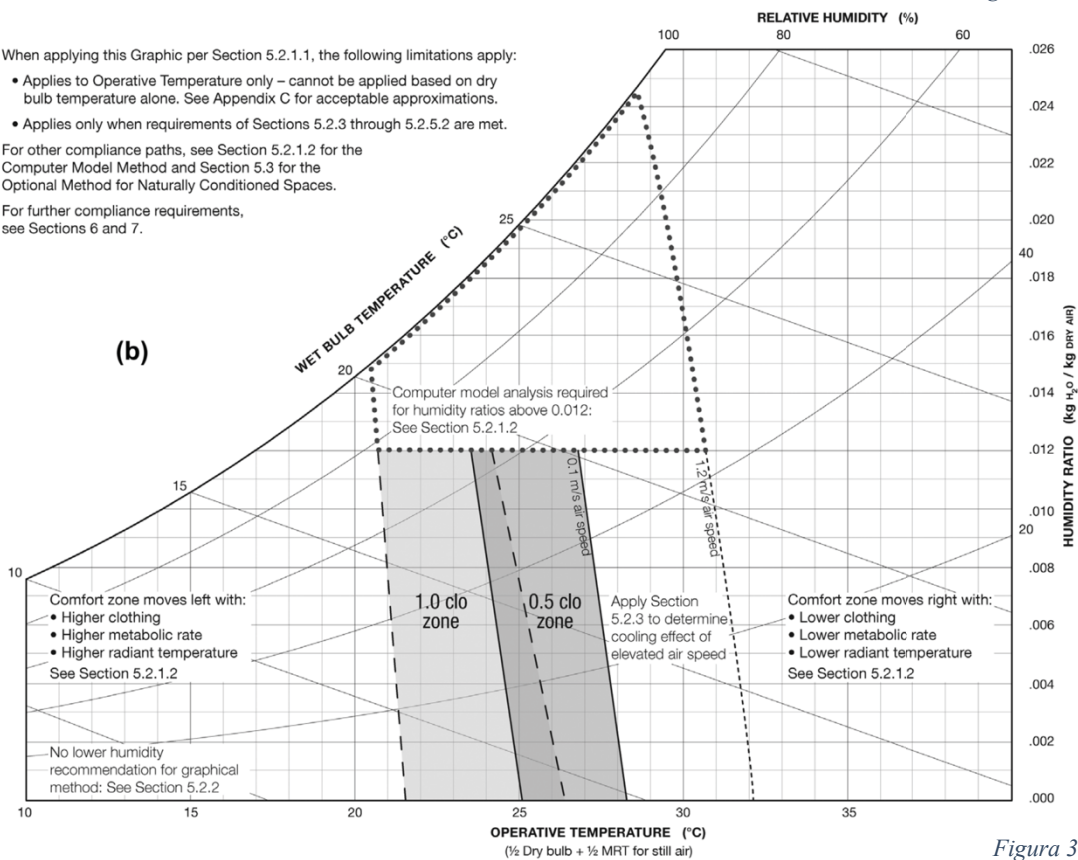


Figura 3

3. Thermal sensation vote TSV

Il comfort termico è la condizione mentale che esprime soddisfazione per l'ambiente termico ed è definita mediante una valutazione soggettiva (ANSI/ASHRAE Standard 55).

Il corpo umano può essere visto come un motore termico, in cui il cibo è l'energia in ingresso. Di tutta l'energia generata solo una parte viene dissipata dal corpo umano, mentre la restante parte viene dispersa verso l'ambiente. Il trasferimento di calore risulta proporzionale alla differenza di temperatura. In ambienti freddi, il corpo cede più calore verso l'esterno, mentre in ambienti caldi il corpo non ne disperde abbastanza. Sia gli scenari caldi che quelli freddi portano a disagio.

Mantenere un adeguato standard di comfort termico per gli occupanti degli edifici è uno degli obiettivi principali degli ingegneri progettisti HVAC (riscaldamento, ventilazione e aria condizionata). La maggior parte delle persone si sente a proprio agio con una temperatura ambientale compresa in un intervallo tra 20 e 22 ° C (68-72 ° F), ma questo intervallo può variare notevolmente al mutare dei soggetti, in funzione di diversi fattori, come: livello di attività, abbigliamento e umidità relativa. L'ambiente termico dell'edificio non influisce solo sul comfort e sulla salute del corpo umano, ma grava anche sul consumo energetico dell'edificio e sull'emissione di inquinanti. Il controllo automatico dell'ambiente termico dell'edificio non dovrebbe essere basato solo sul soddisfacimento dei requisiti di comfort termico umano.

La maggior parte dei sistemi di climatizzazione degli edifici sono controllati sulla base di modelli di comfort termico dell'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Engineers (ASHRAE), incentrato sul Predicted Mean Vote (PMV). Questi modelli si basano principalmente su raccomandazioni empiriche o formule predefinite, ma non prendono in considerazione le caratteristiche fisiologiche dell'individuo. Pertanto, è molto importante ottenere con precisione la sensazione termica di un soggetto e rifletterla sulla logica di controllo dei sistemi di condizionamento in tempo reale. Al fine di sviluppare modelli per stimare la sensazione termica personale, molti ricercatori hanno utilizzato diversi segnali fisiologici. Wei Li, Jili Zhang *, Tianyi Zhao e Ruobing Liang [2] hanno realizzato un algoritmo predittivo per la gestione automatizzata del sistema HVAC per la ricerca del comfort ambientale e conseguentemente del risparmio energetico, Wang [3] ha usato temperature estreme della pelle, come mano, dito e avambraccio, per prevedere lo stato termico delle persone ed esplorare la correlazione tra le temperature della pelle degli arti superiori e la sensazione termica generale. Nakayama et al. [4] si è concentrato sulla temperatura cutanea periferica per la stima della sensazione termica e ha proposto un metodo di stima in grado di prevedere la singola sensazione termica monitorando la temperatura della pelle delle dita. Sugimoto [5] ha proposto un sistema indossabile per misurare dati biologici, dati di attività e dati di localizzazione degli esseri umani nella vita quotidiana. Sim et al. [6] hanno inventato un dispositivo indossabile da polso per monitorare simultaneamente le temperature della pelle del

polso e hanno anche valutato la fattibilità del monitoraggio della temperatura della pelle del polso per la stima della sensazione termica umana. Zhang et al. [7] hanno descritto un modello di sensazione termica basato su dati di temperatura della pelle misurati da 19 singole parti del corpo e hanno scoperto che la sensazione locale sarebbe correlata alla temperatura della pelle sia locale sia del corpo intero.

In particolare, è stato preso spunto dallo studio di Wei Li, Jili Zhang *, Tianyi Zhao, Ruobing Liang [2], replicando la sperimentazione in condizioni invernali e su un maggior numero di soggetti.

Per ottenere un modello previsionale della sensazione termica sono stati rilevati sui soggetti la temperatura della pelle ed il battito cardiaco durante l'arco delle prove, chiedendo alla fine di compilare un questionario per ottenere il voto della sensazione termica con la votazione ASHRAE 7 – point scale. Dai dati ottenuti si è proceduto alla realizzazione di un modello di analisi statistico.

4. Il caso studio

4.1. Aspetti generali

Il presente studio è stato realizzato presso l'Università Politecnica delle Marche, situato ad Ancona in via Breccie Bianche. L'istituto è stato ultimato nel 1976, dall'architetto Pietro Belluschi. Il complesso è ubicato in un quartiere periferico della città, a prevalente destinazione residenziale; esso gode di un ampio parcheggio e di considerevoli zone verdi, risulta quindi esposto in modo molto blando al rumore del traffico veicolare.

La fase sperimentale di questo lavoro di tesi è avvenuta esclusivamente nel "laboratorio di domotica" presente nella parte sottostante della sede centrale dell'Università. Nella seguente tabella sono riportati i dati generali del luogo di monitoraggio.

Luogo	Ancona
Nazione	Italia
Latitudine	43,59°
Longitudine	13,51°
Elevazione	130 m s.l.m.
Zona climatica	D
Edificio	Laboratorio di domotica
Destinazione d'uso	Laboratorio

Tabella 3

L'edificio caso di studio risulta di recente realizzazione, con una struttura leggera in acciaio e tamponature in pannelli prefabbricati. La parte anteriore del laboratorio risulta esposta a Nord con una grande parete continua vetrata, che ricopre quasi la totalità della facciata. Lo studio si è concentrato in questo laboratorio sia in quanto luogo accessibile per i tirocinanti dell'Università, ma anche per la possibilità di poter controllare in modo rapido e dinamico il sistema di climatizzazione. Di seguito è riportato uno schema rappresentativo di una porzione del piano terra comprendente la zona di esecuzione delle prove sperimentali.

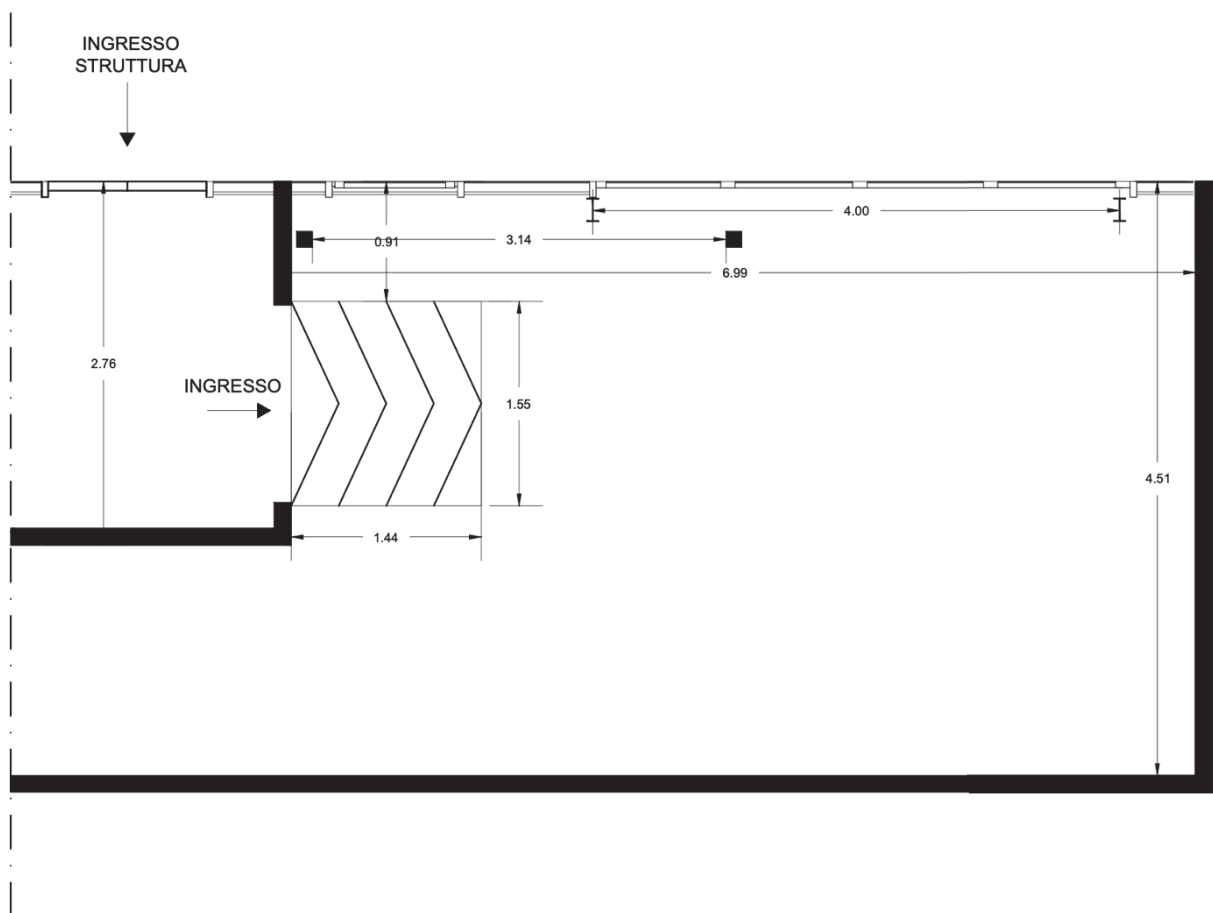


Figura 2

4.2. Area di prova

Il laboratorio di prova è orientato verso nord, per questo non risulta mai esposto alla radiazione diretta del sole, ciò ne determina un forte raffreddamento durante la stagione invernale e un leggero raffrescamento nel periodo estivo. La tecnologia costruttiva inoltre, non aiuta le condizioni di comfort interno, in quanto la struttura leggera è dotata di bassa inerzia e capacità termica, che nel periodo invernale ne determina un notevole raffreddamento dell'ambiente durante le ore notturne, in cui il sistema di riscaldamento rimane spento, portando la temperatura generalmente al di sotto dei 18°C alla riapertura dei laboratori alle ore 9:00; mentre nel periodo estivo ne provoca un surriscaldamento degli ambienti di lavoro nelle ore mattutine.

Per limitare l'influenza negativa delle vetrate sulla temperatura operativa dell'ambiente, sul comfort termico degli occupanti e facilitare la gestione della temperatura, si è deciso di eseguire la prova in zona interna al laboratorio, confinata da teli in tessuto.

Il monitoraggio si è tenuto durante la stagione invernale, dal 15 dicembre 2019 al 20 gennaio 2020; perciò, le temperature interne dell'ambiente sono state sempre tenute sotto controllo dal sistema di riscaldamento, in quanto si sono susseguite giornate mediamente fredde con temperature dell'aria esterna sotto i 10°C.

L'area delimitata come visibile nella figura n. 5 ha una superficie netta di 12 mq e un'altezza demarcata dal controsoffitto di 2,7 m. Per facilitare la gestione della temperatura interna dell'ambiente, avendo, il laboratorio all'interno del quale sono

state eseguite le prove, delle scarse caratteristiche termiche, si è proceduto ad installare al di sopra della pavimentazione uno strato di polistirolo di circa 8 cm.

All'interno dell'area di prova sono state posizionate due scrivanie affiancate con 4 sedie dove far sedere i soggetti su cui effettuare la sperimentazione.

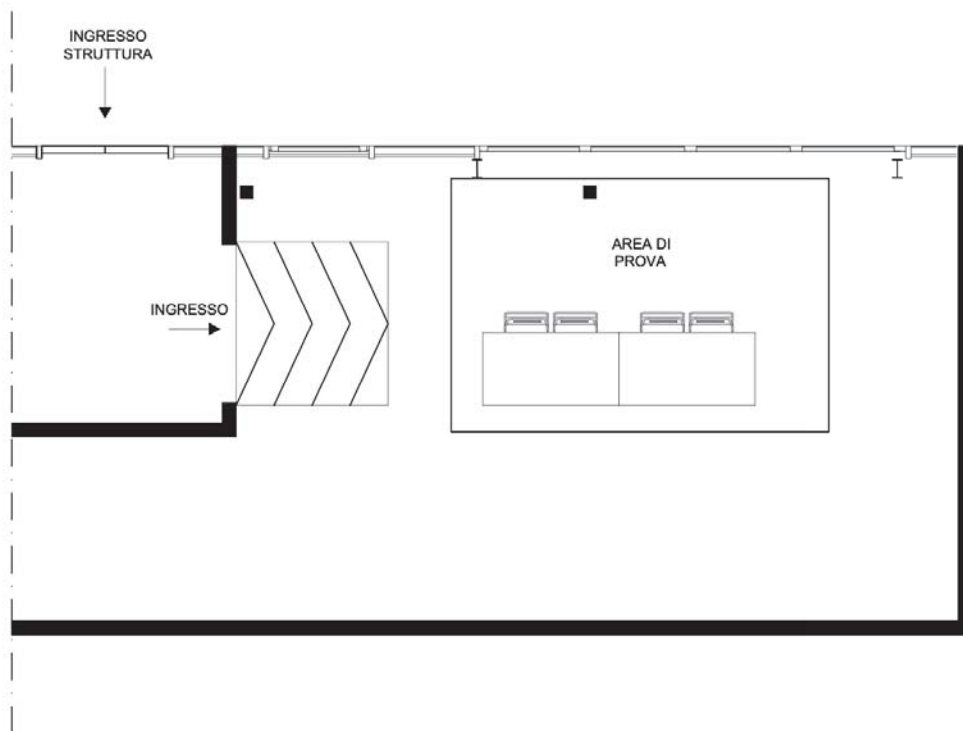


Figura 3

Caratteristiche	
Pianta (m)	2,4 x 3,4
Superficie netta (m ²)	12
Altezza netta (m)	2,7
Volume interno (m ³)	32,4
Rapporto S/V	0,37

Tabella 4

4.3. Sistema costruttivo

L'edificio è costituito da una struttura portante in acciaio e gli orizzontamenti sono realizzati con una lamiera grecata e getto di calcestruzzo di completamento. Le tamponature sono tutte realizzate con dei pannelli prefabbricati installati a secco, mentre l'area finestrata è costituita da una facciata continua con montanti e traversi rettangolari da cielo a terra.

La porta di accesso principale è una porta vetrata ricavata all'interno della facciata continua, che dà l'accesso ad un ambiente antistante al laboratorio; per accedere alla zona in cui è presente la zona di prova vi è un'ulteriore porta, questa volta di tipo tagliafuoco con maniglione antipánico interno. L'area interna risulta totalmente controsoffittata, all'interno del quale sono disposti gli impianti di illuminazione e di climatizzazione come possibile vedere dalla figura seguente.

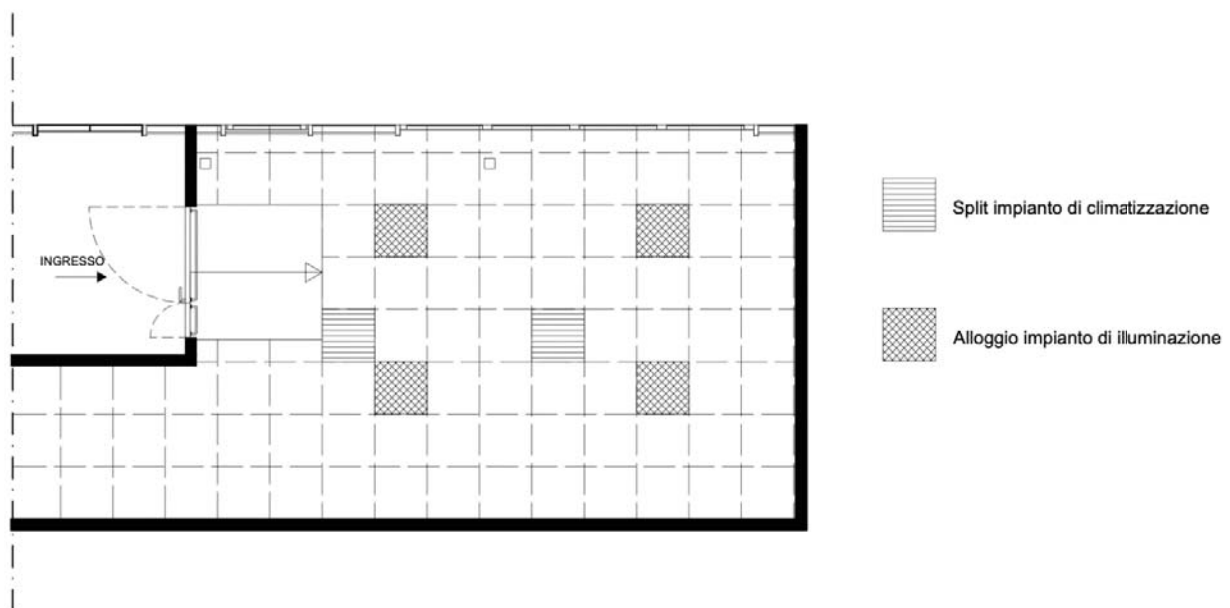


Figura 4

5. Fasi, strumenti e metodi TSV

In questo capitolo verranno descritte dettagliatamente le singole fasi per la valutazione della TSV, la strumentazione utilizzata per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati, e i metodi che sono stati seguiti.

5.1. Tipo di studio, obiettivi e fasi

Il tipo di studio scelto rientra nella categoria del case-study, ovvero lo studio di un singolo ambiente che possa essere rappresentativo e indicativo in merito a differenti caratteristiche.

Gli uffici che si ritengono interessati da questa tipologia di prova, in generale sono costituiti prevalentemente da corpi di fabbrica assestanti, con caratteristiche degli involucri termici molto simili a quello dello studio in questione. Il presente caso può essere rappresentativo anche per destinazioni d'uso differenti, richiedenti comunque determinate condizioni di comfort termico.

L'estensione del monitoraggio all'intero complesso sarebbe eccessivamente gravosa e di difficile gestione; invece analizzando dettagliatamente un ambiente-modello, si riducono notevolmente le variabili e le analisi possono essere più accurate.

Per queste ragioni, sono state previste l'esecuzione delle prove all'interno di una piccola zona chiusa. La fase iniziale ha avuto la funzione di effettuare uno studio preliminare sui parametri biometrici degli occupanti e sulla gestione del sistema di climatizzazione dell'ambiente, in modo da individuare le eventuali criticità della sperimentazione.

Il monitoraggio si è posto i seguenti obiettivi:

- L'analisi del comportamento dell'utenza in risposta a diverse condizioni climatiche (variazione delle condizioni esterne);
- La verifica dei principali modelli di comfort (modello adattivo e modello di Fanger);
- L'analisi di temperatura superficiale della pelle e battito cardiaco in relazione alla sensazione termica;

In totale ogni soggetto è stato sottoposto all'osservazione per 4 volte, ognuna delle quali per una durata di circa un'ora e trenta minuti per volta. Ogni osservazione conta 4 fasi di circa 15 minuti, in cui i primi 5 minuti hanno avuto la funzione di garantire un adeguamento termico del soggetto all'ambiente termico, nei successivi 10 minuti al soggetto è stato somministrato un testo da leggere e comprendere al fine di simulare una tipica attività da ufficio. Al termine di ogni fase è stato fornito un questionario da compilare per ottenere i dati della sensazione termica del soggetto.



Figura 5

5.2. Parametri monitorati

Il monitoraggio della zona di sperimentazione è andato dal 15 dicembre 2019 al 20 gennaio 2020. I parametri monitorati sono:

- Temperatura ambientale ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura media radiante ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura operativa ($^{\circ}\text{C}$);
- Velocità dell'aria (m/s);
- Temperatura dell'aria esterna ($^{\circ}\text{C}$);

- Temperatura superficiale della pelle (°C);
- Battito cardiaco (bpm);
- Sensazione termica.

5.3. Strumentazione

Al fine di recepire tutti i dati necessari per la valutazione della Thermal sensation, ovvero temperatura della pelle e battito cardiaco si è reso necessario l'utilizzo di sensori portatili da installare sul soggetto prima dell'esecuzione di ogni prova. Per il controllo della temperatura operativa nella zona di esecuzione della prova è stata collegata una centralina Dantec all'impianto HVAC del laboratorio.

5.3.1. Optical Pulse Sensor

Il sensore ottico di impulsi misura il segnale del fotopleletismografo (PPG) da un dito o un lobo dell'orecchio (o altra posizione del tessuto capillare sul corpo), che con un po' di elaborazione, può essere utilizzata per stimare la frequenza cardiaca. Il sensore ottico di impulsi è disponibile in due distinte tipologie: un'opzione più adatta a misurare il PPG dal lobo dell'orecchio; un'altra invece più adatta per misurare la PPG sul dito.

Il segnale misurato dal sensore di impulsi ottici Shimmer è un fotopleletismografo (PPG). Un esempio di come dovrebbe apparire questo segnale è fornito nella Figura n. 7.

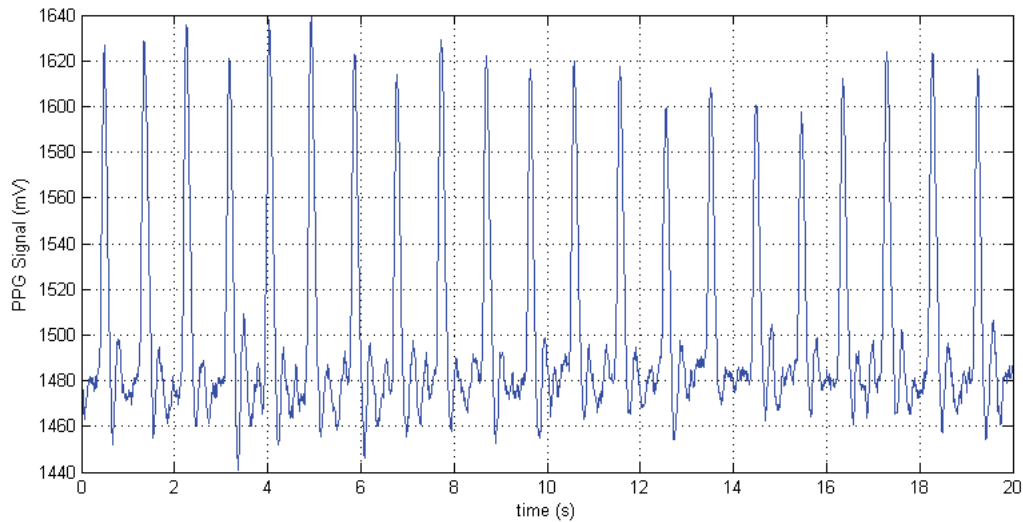


Figura 6

Il segnale ha un picco distinto per ciascun impulso e un'ampiezza relativamente bassa tra gli impulsi. Una variazione significativa può essere vista nell'ampiezza dei picchi di impulso; questo risulta in gran parte dovuto alla respirazione. Anche altri fattori possono influenzare l'ampiezza del segnale e l'altezza relativa dei picchi, ad esempio, l'attività muscolare o dei movimenti nella posizione di rilevamento.

Per convertire il segnale PPG in una stima della frequenza cardiaca (FC), i singoli impulsi devono essere identificati dal segnale PPG e dovrà essere misurato il tempo tra gli impulsi successivi. È molto facile identificare visivamente gli impulsi dall'esempio mostrato in Figura 7, che ha un segnale di buona qualità.

Il software ConsensusPRO consente di acquisire i dati da uno o più dispositivi Shimmer. Se il dispositivo Shimmer è configurato per lo streaming dei dati PPG

uno dei canali analogici di espansione interna, il segnale PPG verrà convertito in una stima di frequenza cardiaca. La frequenza cardiaca stimata verrà visualizzata graficamente e può essere scritta in un file .txt.

5.3.2. GSR +

La funzione principale dell'unità GSR + è di misurare la risposta galvanica cutanea (GSR), nota anche come resistenza elettro-dermica, attività elettrodermica o resistenza della pelle, tra due elettrodi riutilizzabili fissati a due dita di una mano. In risposta agli stimoli interni ed esterni, le ghiandole sudoripare diventano più attive, aumentando il contenuto di umidità sulla pelle e permettendo al flusso di corrente elettrica di fluire più facilmente, modificando l'equilibrio degli ioni positivi e negativi nel fluido secreto (aumentando la conduttanza della pelle e diminuendo così la resistenza della pelle).

La scheda/hardware contiene una rete di resistori interni, che funziona come un potenziale divisore e fornisce una tensione che può essere convertita dall'ADC Shimmer in un numero a 12 bit, che rappresenta la resistenza esterna della pelle. La conduttanza cutanea può essere derivata dal valore di resistenza cutanea.

La resistenza tipica della pelle varia da $47\text{k}\Omega$ a $1\text{ M}\Omega$ (conducibilità da $21\mu\text{S}$ a $1\mu\text{S}$). L'unità GSR + è stata progettata per risolvere i livelli di resistenza della pelle da $8\text{k}\Omega$ a $4,7\text{M}\Omega$ (da $125\mu\text{S}$ a $0.2\mu\text{S}$).

5.3.3. Centralina Dantec

Il sistema ComfortSense è progettato per la ricerca e lo sviluppo di sistemi di riscaldamento e condizionamento, che richiedono misurazioni multipunto della velocità e della temperatura dell'aria. ComfortSense è dotato di sensori omnidirezionali con una risposta in frequenza di 2 Hz per ottenere misurazioni del tiraggio.

Sono inoltre rilevabili i dati di umidità e della temperatura operativa, insieme a un potente software applicativo con presentazione grafica dei risultati, tra cui il voto medio previsto (PMV) e la percentuale prevista insoddisfatto (PPD).

Il sistema ComfortSense è progettato per indagare sul comfort termico in cui sono richieste misure accurate e di alta qualità, per caratterizzare l'ambiente termico all'interno di edifici come: uffici, teatri, automobili, treni e aerei.

5.4. Metodo di analisi statistico

I metodi statistici sono stati utilizzati per analizzare i dati raccolti e ottenere modelli di stima della sensazione termica umana. L'analisi di regressione è una tecnica statistica ampiamente utilizzata per indagare e modellare la relazione tra diverse variabili [8].

Per ottenere il modello previsionale su descritto è stata utilizzata l'analisi della regressione lineare multipla, una tecnica statistica che può essere impiegata per analizzare la relazione tra una variabile dipendente (TSV) e diverse variabili

indipendenti (T_{skin} e HR). L'obiettivo dell'analisi è prevedere i valori assunti da una variabile dipendente a partire dalla conoscenza di quelli osservati su più variabili indipendenti.

5.4.1. Regressione multipla lineare

La relazione tra le variabili dipendenti e indipendenti può essere descritta come:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) + \varepsilon = f(X) + \varepsilon$$

esplicando la relazione di tipo lineare si ottiene l'equazione:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon$$

nella quale dovranno essere stimati i parametri β_i .

dove β_0 rappresenta l'intercetta, β_1 e β_2 la pendenza, X_1 e X_2 le variabili indipendenti e ε_i l'errore.

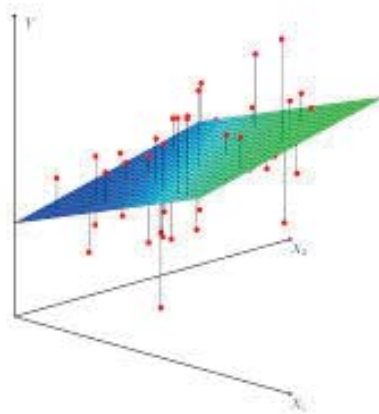


Figura 7

A tal scopo è necessario osservare le variabili esplicative e la variabile dipendente su un campione di n osservazioni.

La rappresentazione dei dati campionari potrà essere scritta in modo compatto:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{n1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{n2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

Ipotesi del modello di regressione multipla:

- 1) $E[\varepsilon] = 0$;
- 2) $E[\varepsilon\varepsilon'] = \sigma^2 I$;
- 3) X è una matrice deterministica;
- 4) $R(X) = k < n$.

Dalle ipotesi si ricava il vettore β dell'intercetta e dei coefficienti di regressione:

$$\beta = (X'X)^{-1}X'Y$$

5.4.2. Indice di determinazione lineare

L'indice di determinazione lineare R^2 rappresenta la frazione di varianza di Y che è spiegabile dai regressori X inclusi nel modello. È l'indice più utilizzato per valutare la bontà di adattamento del modello di regressione, che può essere espresso da:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

dove y_i è la risposta individuale all'osservazione i -esima, \bar{y} è il valore medio di y_i delle n osservazioni, \tilde{y}_i è il valore di y stimato dal modello di regressione per l'osservazione i -esima.

- $R^2 = 1$ indica un adattamento perfetto;
- $R^2 = 0$ indica che il modello non è adatto o che non esiste alcuna relazione.

6. Risultati sperimentali TSV

Nel presente capitolo vengono esposti i risultati ottenuti dalle prove sperimentali.

Il sensore che rileva la temperatura superficiale della pelle è stato impostato per la prova con una frequenza di rilevazione pari ad 1 Hz, mentre il sensore optical pulse per il rilevamento del battito cardiaco permetteva una frequenza minima di 256 Hz.

I dati elencati nelle tabelle successive rappresentano la media dei valori misurati negli ultimi 5 minuti delle prove, questo per eliminare eventuali incertezze dovute all'adattamento termico del soggetto all'ambiente circostante.

CODICE	SESSO	ETA'	T = 17°C			T = 22°C			T = 17°C (VR)		
			Tskin	HEART RATE	VOTO	Tskin	HEART RATE	VOTO	Tskin	HEART RATE	VOTO
1	F	23	33,05	74	-3	34,28	81	1	32,31	72	-1
			33,53	67	-1	34,27	78	0	31,6	70	-1
			33,4	63	-1	34,21	68	0	31,35	66	-1
2	F	29	35,84	53	-1	34,08	51	0	34,08	52	0
			33,32	55	-2	33,79	47	0	33,67		0
			33,83	48	-1	34,23	47	0	33,02	47	-1
3	F	24	35,02	68	-1	35,48	67	1			-2
			34,28	73	-1	35,54	64	0			-2
			34,16	65	-1	35,64	62	0			0
4	F	24			-2	32,97	83	1			-1
					0	30,61	88	0			-1
					0	30,86	86	2			-1
5	M	25	35,02	62	1	32,73	66	2			-1
			34,28	69	1	32,73	73	1			-1
			34,16	62	1	31,9	66	1			0
6	M	23			-1	32,67	75	0	28,06	72	-1
					-1	31,79	76	0	26,85	71	-1
					-1	30,04	74	0	26,65	69	-1
7	F	31	32,06	73	-2			1			0
			31,65	65	-2			0			0
			30,62	59	0			0			0
8	F	24	30,17	84	-2	30,53	89	2			0

			28,9	78	-2	30,08	86	2			-1
			26,9	84	-1	29,62	83	2			-1
9	M	28	31,49	76	-2	32,31	76	1	30,72	84	-1
			29,17	74	-2	31,75	79	1	29,93	81	-1
			29,92	77	-2	30,58	75	1	27,66	83	-1
10	M	28	31,43	78	0			0	31,3	72	-1
			31,14	82	-1			0	30,06	73	-1
			31,05	74	-1			1	29,24	73	-1
11	M	26			-2			0			-2
					0			0			-2
					-1			0			-2
12	F	25			-1			0	29,66	58	-2
					-1			0	28,53	58	-2
					-2			0	27,99	57	-2
13	M	23	29,44	92	-1	32,66	69	0			-1
			29,67	85	-1	31,8	70	2			-1
			29,89	83	-1	30,12	71	1			1
14	M	28	29,62	63	-1	29,22	53	0			0
			28,77	63	-1	28,74	50	0			0
			29,4	52	-1	27,4	49	0			0
15	F	26	31,01	79	-2	34,57	71	1			-1
			31,01	73	-2	34,1	67	1			-1
			31,31	70	-2	33,98	66	1			-1
16	M	23			1			2	31,28	68	1
					-2			0	29,4	67	-1
					-3			0	28,73	66	-2
17	F	23	28,7	74	-2			2	27,56	80	1
			27,87	68	-2			2	28,64	81	-1
			25,7	62	1			2	31,08	79	-1
18	F	24	30,05	87	2	29,49	68	1			-1
			29,11	76	-2	28,13	72	2			-1
			27,63	75	-3	29,89	71	0			-1
19	F	30	27,72	76	-1	35	77	0	33,4	78	0
			27,43	67	0	35,89	70	0	32,96	72	0
			26,81	70	0	35,4	76	1	32,46	73	0
20	M	31	32,54	78	-1	32,8	73	0			0
			32,45	72	-2	33,41	67	0			-1
			32,04	68	-2	33,19	76	0			-1

21	F	27	30,96	67	-2	34,63	59	0	32,91	67	-1
			29,52	62	-2	34,55	63	0	32,94	72	-1
			29,91	65	-2	34,19	61	0	32,33	64	-1
22	M	32	33,25	63	-2	33,28	70	0	35,7	71	0
			32,55	60	-2	31,16	66	0	35,83	70	0
			32,49	59	-2	31,49	68	0	35,82	72	0
23	M	32	30,62	105	-2	31,63	73	1	32,88		-1
			30,26	93	-1	31,35	70	1	32,12		-1
			29,77	93	-1	31,41	71	1	31,42	78	-1

Tabella 5

Nei grafici sottostanti vengono riportati i risultati sperimentali.

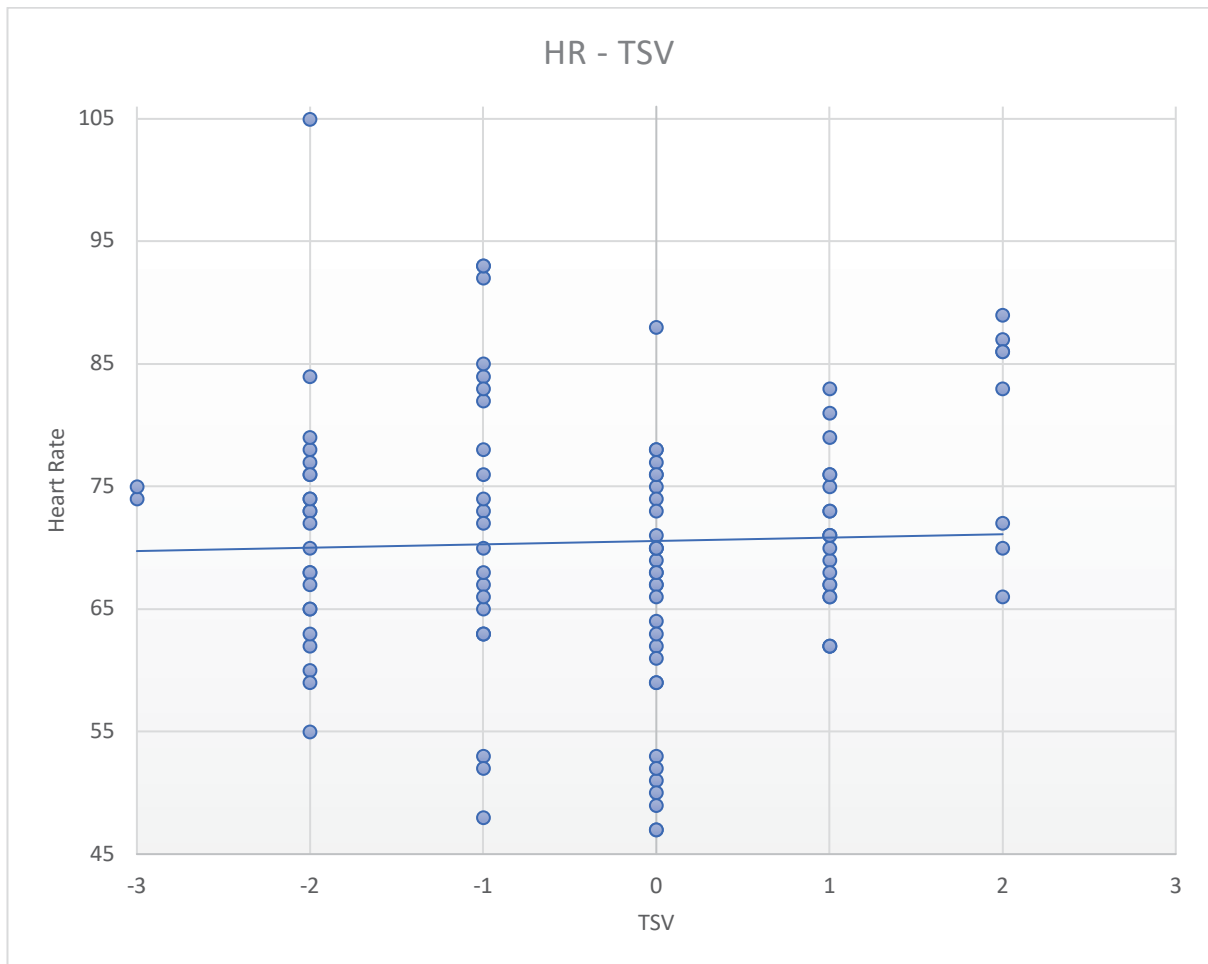


Tabella 6

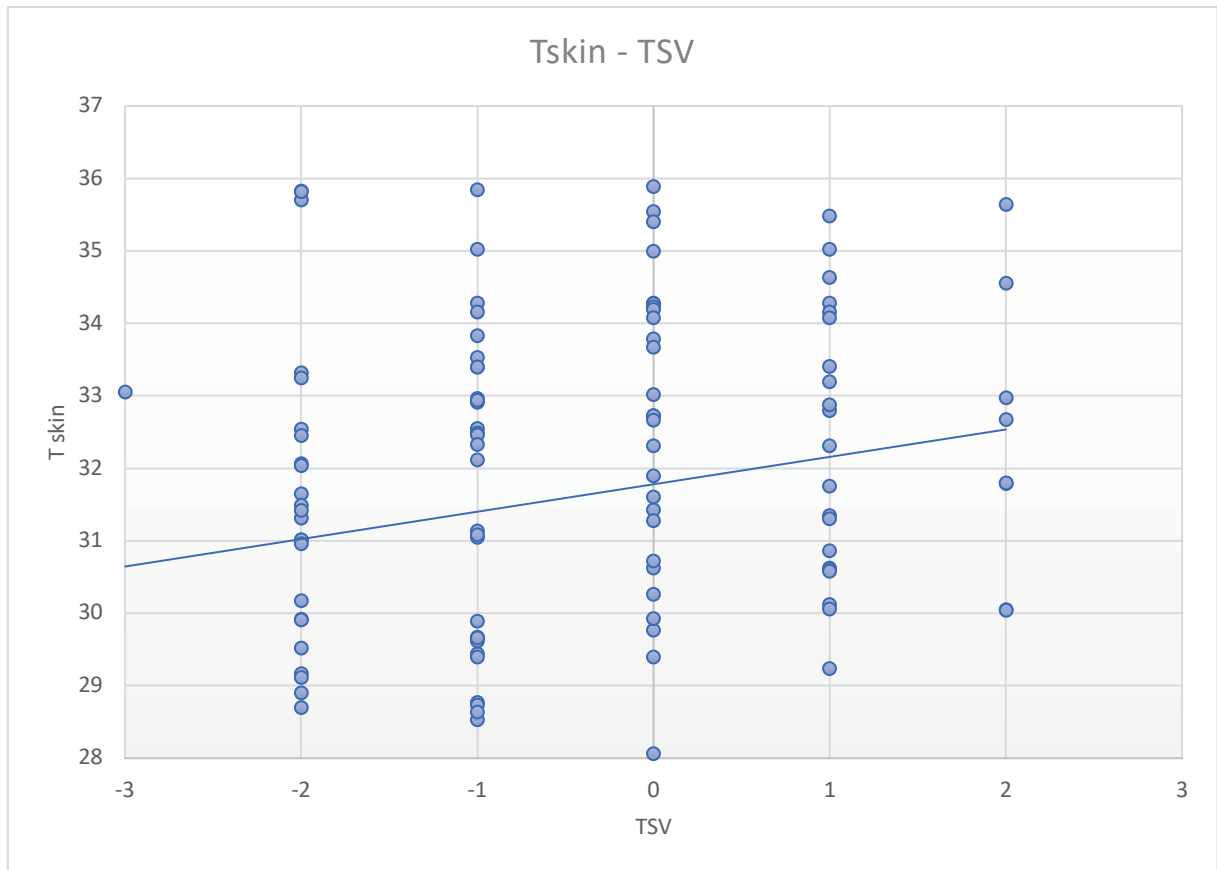


Tabella 7

Da una prima osservazione dei dati reperiti si evince come non ci sia un vero e proprio andamento della TSV in funzione delle variabili biometriche studiate.

Di seguito si riporta il calcolo della regressione lineare multipla.

Matrice XX'		
138,00	4345,53	9736,00
4345,53	137631,07	305853,56
9736,00	305853,56	701076,00

Tabella 8

Matrice inversa		
1,99	-0,05	-0,01
-0,05	0,00	0,00
-0,01	0,00	0,00

Tabella 9

Matrice $X'Y$
-61,00
-1834,87
-4193,00

Tabella 10

B'
-5,25
0,12
0,01

Tabella 11

Mediante il processo esposto nel capitolo 5.4.1. si ricava il vettore β dell'intercetta. La relazione tra le variabili indipendenti e quelle dipendenti può essere descritta come:

$$Y = -5,247 + 0,12 \cdot T_{skin} + 0,0134 \cdot HR$$

Al fine di valutare l'attendibilità del modello realizzato, si ricava il fattore R^2 come definito nel capitolo 5.4.2.. Dal calcolo è derivato un fattore R^2 pari a 0,0617, dove un fattore 1 individua una correlazione perfetta, mentre un valore pari a 0 indica che la relazione non sussiste.

Un fattore R^2 quindi evidenzia come non sia possibile definire una relazione tra i fattori biometrici della temperatura della pelle e del battito cardiaco alla sensazione termica. Questo può essere dovuto alle notevoli variabili che influenzano la sensazione termica degli esseri umani e non può essere ricondotta alla valutazione di soli due parametri, inoltre, il comfort non è meramente legato ad una evidenza scientifica, ma piuttosto una preferenza personale/sociale/circostanziale.

7. Fasi, strumenti e metodi - occupazione dinamica

In questo capitolo verranno descritte dettagliatamente le singole fasi per la valutazione del consumo energetico e comfort termico in funzione della presenza di un'occupazione reale e un'occupazione standard, la strumentazione utilizzata per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati, e i metodi che sono stati seguiti.

7.1. Tipo di studio, obiettivi e fasi

La gestione ottimale dei sistemi che consumano energia all'interno degli edifici è di grande importanza per ridurre al minimo il consumo e soddisfare gli occupanti. Il funzionamento dei sistemi di climatizzazione dipende fortemente dalla presenza degli occupanti. Considerare le informazioni sull'occupazione dinamica è diventato cruciale al fine di riflettere il dinamismo degli occupanti all'interno degli uffici. Pertanto, sono necessarie strategie di controllo incentrate sull'occupazione, in modo da migliorare la gestione energetica degli edifici. D'altro canto, la necessità di controlli di comfort localizzati e personalizzabili è in aumento negli edifici per uffici per migliorare la soddisfazione degli occupanti e, di conseguenza, la loro produttività. A tal fine, in questa fase si è valutata la possibilità di considerare nella gestione del sistema HVAC degli input dinamici basati sull'occupazione e il potenziale risparmio energetico e miglioramento del comfort ambientale.

Sono stati sviluppati diversi modelli basati sulla simulazione dinamica del consumo di energia negli uffici, per sfruttare i dati relativi all'occupazione. Per realizzare la simulazione dinamica sono stati presi in considerazione due profili di occupazione,

uno standard e uno dinamico. Il secondo basato su dati di occupazione reali, raccolti in un periodo di un anno.

Il presente caso di studio può essere rappresentativo anche per destinazioni d'uso differenti, con un'alta variabilità occupazionale, richiedenti comunque determinate condizioni di comfort termico.

La fase sperimentale si basa sulla realizzazione di due modelli di simulazione dinamica degli edifici, il primo avente caratteristiche standard che rispettano i limiti normativi, il secondo con prestazioni dell'involucro molto elevate. Vengono così definiti due modelli:

- 1) Modello standard;
- 2) Modello fortemente isolato.

Per ogni modello, in seguito, sono state considerate separatamente due condizioni di occupazione, una standard per un uso ufficio e una derivante dall'osservazione della reale occupazione.

Infine, per ogni modello su esposto sono state effettuate simulazioni dinamiche con diverse temperature di set-point, in modo da considerare non solo la variazione del consumo energetico e comfort termico dei diversi modelli, ma anche come essi mutino in funzione dei diversi set-point delle temperature.

Il monitoraggio si pone come obiettivi:

- L'analisi del consumo energetico di un edificio standard;
- L'analisi del consumo energetico di un edificio fortemente isolato;

- Valutazione del comfort termico in un edificio standard;
- Valutazione del comfort termico in un edificio fortemente isolato;
- Valutazione del possibile utilizzo dei dati di occupazione dinamica come input per la gestione dei sistemi HVAC.

I limiti del presente studio sono legati all'impossibilità di avere una curva dell'occupazione caratteristica dell'edificio in questione, e la necessità di realizzare i modelli dinamici su profili occupazionali tratti da articoli scientifici.

7.2. Parametri monitorati

Il modello di simulazione considera un'intera annualità, dal 1° gennaio al 31 dicembre. I parametri monitorati sono:

- Temperatura ambientale (°C);
- Temperatura media radiante (°C);
- Temperatura operativa (°C);
- Consumo energetico (kWh);
- Comfort degli occupanti (h).

8. Prestazione energetica di un edificio

Le chiusure di un edificio hanno il compito di proteggere l'ambiente interno dal clima esterno e di implementare le prestazioni energetiche dell'edificio. La norma UNI EN ISO 6946:2008 prescrive un metodo di calcolo per la determinazione della resistenza

termica e della trasmittanza termica degli elementi edilizi, al fine di definire il flusso di calore che li attraversa.

8.1. Requisiti energetici minimi

Nel modello standard sono stati definiti dei pacchetti non strutturali tali da rispettare i requisiti minimi di prestazione energetica definiti nell'allegato 1 del D. M. del 26 giugno 2015 allineate con le norme dettate dal CEN a supporto della direttiva 2010/31/UE.

Di seguito vengono riportate le tabelle della normativa a cui si è fatto riferimento.

Tabella 1- Trasmittanza termica U massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione

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

Tabella 2 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno soggette a riqualificazione

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

Tabella 3 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno soggette a riqualificazione

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

Tabella 4 - Trasmittanza termica U massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati soggette a riqualificazione

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

Tabella 6 – Requisiti e condizioni di prova per pompe di calore elettriche servizio riscaldamento (macchine reversibili e non)

Tipo di pompa di calore Ambiente esterno/interno	Ambiente esterno [°C]	Ambiente interno [°C]	COP
aria/aria	Bulbo secco all'entrata : 7 Bulbo umido all'entrata : 6	Bulbo secco all'entrata: 20 Bulbo umido all'entr.: 15	3,5
aria/acqua potenza termica utile riscaldamento ≤ 35 kW	Bulbo secco all'entrata : 7 Bulbo umido all'entrata : 6	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	3,8
aria/acqua potenza termica utile riscaldamento ≥ 35 kW	Bulbo secco all'entrata : 7 Bulbo umido all'entrata : 6	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	3,5
salamoia/aria	Temperatura entrata: 0	Bulbo secco all'entrata: 20 Bulbo umido all'entr.: 15	4,0
salamoia/ acqua	Temperatura entrata: 0	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	4,0
acqua/aria	Temperatura entrata: 15 Temperatura uscita: 12	Bulbo secco all'entrata: 20 Bulbo umido entrata: 15	4,2
acqua/acqua	Temperatura entrata: 10	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	4,2

Tabella 7 – Requisiti e condizioni di prova per pompe di calore elettriche servizio raffrescamento (macchine reversibili e non)

Tipo di pompa di calore Ambiente esterno/interno	Ambiente esterno [°C]	Ambiente interno [°C]	EER
aria/aria	Bulbo secco all'entrata : 35 Bulbo umido all'entr.: 24	Bulbo secco all'entrata: 27 Bulbo umido all'entr.: 19	3,0
aria/acqua potenza termica utile riscaldamento ≤ 35 kW	Bulbo secco all'entrata : 35 Bulbo umido all'entr.: 24	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	3,5
aria/acqua potenza termica utile riscaldamento ≥ 35 kW	Bulbo secco all'entrata : 35 Bulbo umido all'entr.: 24	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	3,0
salamoia/aria	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Bulbo secco all'entrata: 27 Bulbo umido all'entr.: 19	4,0
salamoia/ acqua	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	4,0
acqua/aria	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Bulbo secco all'entrata: 27 Bulbo umido all'entr.: 19	4,0
acqua/acqua	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	4,2

8.2. Trasmittanza termica involucro

La trasmittanza termica risulta così definita come il flusso di calore $[W/m^2K]$ che passa attraverso una struttura di $1 m^2$ di superficie e con una differenza di temperatura tra i lati della struttura stessa pari ad $1K$.

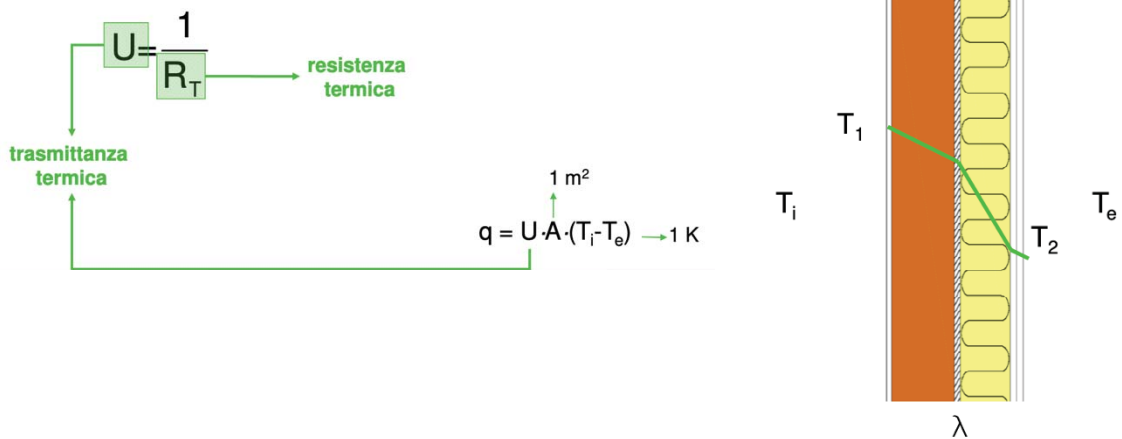


Figura 8

Lo studio dei fenomeni termici si basa sull'analogia con i fenomeni elettrici. Il calcolo della resistenza termica offerta da una parete si differenzia nel caso di "strati omogenei" e "strati eterogenei".

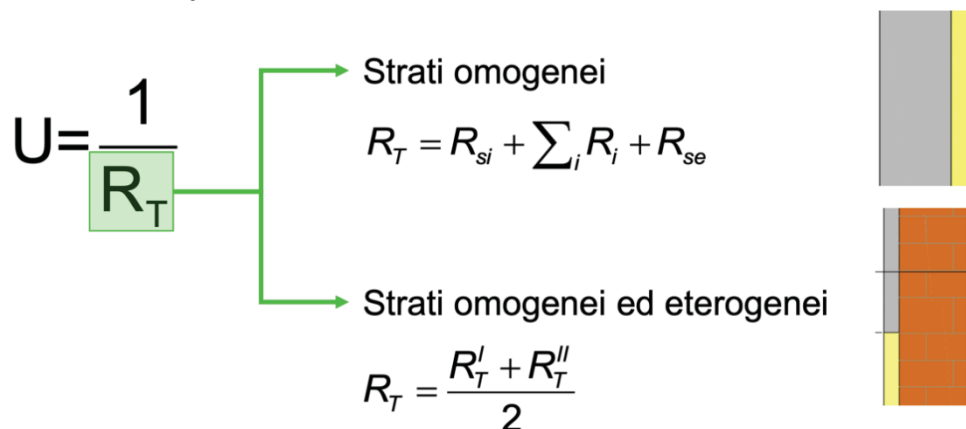


Figura 9

Le resistenze superficiali sono date dalla somma in parallelo del contributo della resistenza di convezione e di irraggiamento. Questi risultano influenzati dalla tipologia di flusso considerato e dalla loro inclinazione e dalla velocità dell'aria in prossimità della superficie.

La resistenza dei singoli strati omogenei invece è definita come:

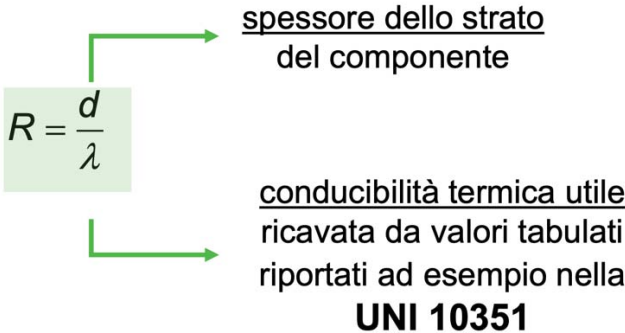


Figura 10

Una volta calcolata la trasmittanza termica del componente in esame è necessario prendere in considerazione una correzione ΔU per tenere in conto dei vuoti d'aria presenti nella struttura, dei fissaggi meccanici e delle precipitazioni che influenzano il valore calcolato.



Figura 11

8.2.1. Prestazione involucro opaco – Edificio standard

Per la realizzazione dei seguenti modelli di simulazione si è deciso di utilizzare dei materiali molto frequenti nell'edilizia comune, in modo da rendere lo studio esemplificativo delle caratteristiche energetiche delle nuove costruzioni realizzate sul territorio italiano.

In particolare, è stato utilizzato:

- come parete di tamponatura, una classica parete in mattoni forati 30x25 cm con una coibentazione a cappotto con spessore di 6 cm, di seguito sono riportate le tabella in cui sono definite le stratigrafie dall'interno all'esterno e il calcolo dei parametri statici e dinamici delle strutture.

1) Scegliere il tipo di componente edilizio			2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)						24		
Chiusura verticale			Periodo delle variazioni termiche T						[sec]	86400	
			Resistenza termica sup interna Rsi						[m ² K/W]	0,13	
			Resistenza termica sup esterna Rse						[m ² K/W]	0,04	
Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conduttività termica (l) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (ρ) [Kg/m3]	Resistenza termica aria [m ² K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m ² k/W]	
Rsi	Aria	Strato laminare interno		1	2	3	4	5		0,130	
1		Intonaco	0,015	0,540		1000	1500		0,100	0,028	
2		Laterizio poroton	0,300	0,230		1000	860		0,086	1,304	
3		Isolante XPS	0,060	0,036		1200	30		0,166	1,667	
4		Intonaco calce e cemento	0,015	0,900		1000	1800		0,117	0,017	
Rse	A	Strato laminare esterno								0,040	
Spessore totale componente [cm]			39,00		Resistenza termica totale [m ² K/W]						3,185
http://www.mygreenbuildings.org			RISULTATI						2010 @ Ing. Andrea Ursini Casalena		
Regime periodico stabilizzato			T = 24 ore			Regime stazionario					
Fattore di decremento (attenuazione)		fd	[-]	0,063		Massa superficiale		Ms	[kg/m ²]	309	
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)		φ	[h]	15,24		Resistenza termica totale		Rt	[m ² K/W]	3,185	
Trasmittanza termica periodica		Yie	[W/m ² K]	0,020		Trasmittanza		U	[W/m ² K]	0,314	
Ammettenza termica lato interno		Yii	[W/m ² K], [h]	3,26		Conduttanza		C	[W/m ² K]	0,332	
Ammettenza termica lato esterno		Yee	[W/m ² K], [h]	2,08		Capacità termica areica		Cta	[kJ/m ² K]	310	
Capacità termica areica lato interno		k1	[kJ/m ² K]	44,9		Costante di tempo		τ	[h]	274	
Capacità termica areica lato esterno		k2	[kJ/m ² K]	28,4							
Fattore di smorzamento superficiale interno											
Parete disperdente		fsd	[-]	0,576							
Parete interna		fsi	[-]	0,576							

Tabella 12

- come solaio di base, un pacchetto costituito da una soletta di calcestruzzo armato di spessore 20 cm, seguito da un massetto per gli impianti di spessore

10 cm, uno strato di isolamento termico dallo spessore di 8 cm e infine, un ulteriore massetto alleggerito di spessore 5 cm. In questo studio però, è stato considerato il solaio di base come adiabatico; la struttura è stata comunque modellata nel programma, in quanto influenza il comportamento dinamico dell'edificio.

- come solaio di copertura, un pacchetto costituito da un solaio in latero-cemento dallo spessore di 25 cm, uno strato di isolante di spessore 10 cm, un massetto classico di sabbia e cemento di 5 cm, un'intercapedine d'aria di 2,5 cm e una copertura in tegole di laterizio.

1) Scegliere il tipo di componente edilizio				2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)				24				
Chiusura orizzontale (flusso ascendente)				Periodo delle variazioni termiche T		[sec]		86400				
				Resistenza termica sup interna Rsi		[m2K/W]		0,10				
				Resistenza termica sup esterna Rse		[m2K/W]		0,04				
Descrizione degli strati			Spessore (s) [m]	Conductività termica (l) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (p) [Kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2k/w]	
Rsi	Aria	Strato laminare interno									0,100	
1		Intonaco	0,015	0,900		1000	1800		0,117	0,128	0,017	
2		Pignatta	0,200	0,350		840	600		0,138	1,447	0,571	
3		Soletta CLS armato	0,050	1,800		1000	2500		0,141	0,355	0,028	
4		Isolante XPS	0,100	0,036		1200	30		0,166	0,603	2,778	
6		Massetto	0,050	0,900		1000	1800		0,117	0,426	0,056	
10		Intercapedine d'aria	0,025					0,180	-	-	0,180	
11		Tegole	0,020	0,350		840	600		0,138	0,145	0,057	
Rse		Strato laminare esterno									0,040	
Spessore totale componente [cm]			46,00			Resistenza termica totale [m2K/W]			3,826			
http://www.mygreenbuildings.org				RISULTATI				2010 @ Ing. Andrea Ursini Casalena				
Regime periodico stabilizzato						Regime stazionario						
T = 24 ore												
Fattore di decremento (attenuazione)			fd [-]	0,058		Massa superficiale			Ms [kg/m2]	377		
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)			φ [h]	14,18		Resistenza termica totale			Rt [m2K/W]	3,826		
Trasmittanza termica periodica			Yie [W/m2K]	0,015		Trasmittanza			U [W/m2K]	0,261		
Ammettenza termica lato interno			Yii [W/m2K] . [h]	3,61		2,63		Conduttanza			C [W/m2K]	0,271
Ammettenza termica lato esterno			Yee [W/m2K] . [h]	3,29		2,20		Capacità termica areica			Cta [kJ/m2K]	356
Capacità termica areica lato interno			k1 [kJ/m2K]	49,8		65,8		Costante di tempo			τ [h]	379
Capacità termica areica lato esterno			k2 [kJ/m2K]	45,3		50,9						
Fattore di smorzamento superficiale interno												
Parete disperdente			fsd [-]	0,639		0,671						
Parete interna			fsi [-]	0,638		0,670						

Tabella 13

8.2.2. Prestazione involucro opaco – Edificio fortemente isolato

Nel secondo modello sono state inserite le seguenti stratigrafie:

- come parete di tamponatura, per migliorare le caratteristiche termiche della parete sono stati utilizzati dei mattoni poroton isolati 30x25 cm, con una coibentazione a cappotto con spessore di 10 cm, di seguito sono riportate le tabelle in cui sono definite le stratigrafie dall'interno all'esterno e il calcolo dei parametri statici e dinamici delle strutture.

1) Scegliere il tipo di componente edilizio			2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)						24	
Chiusura verticale			Periodo delle variazioni termiche T						[sec]	86400
			Resistenza termica sup interna Rsi						[m ² K/W]	0,13
			Resistenza termica sup esterna Rse						[m ² K/W]	0,04
Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conduttività termica (l) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (ρ) [Kg/m ³]	Resistenza termica aria [m ² K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m ² k/w]
Rsi	Aria	Strato laminare interno	1	2	3	4	5			0,130
1		Intonaco termico	0,015	0,090	840	720		0,064	0,234	0,167
2		Laterizio poroton isolato	0,300	0,100	1000	860		0,057	5,305	3,000
3		Isolante XPS	0,100	0,036	1200	30		0,166	0,603	2,778
4		Intonaco termico	0,015	0,090	840	720		0,064	0,234	0,167
Rse		Strato laminare esterno								0,040
Spessore totale componente [cm]			43,00			Resistenza termica totale [m ² K/W]			6,281	
http://www.mygreenbuildings.org			RISULTATI				2010 @ Ing. Andrea Ursini Casalena			
Regime periodico stabilizzato			T = 24 ore			Regime stazionario				
Fattore di decremento (attenuazione)			fd [-]	0,011		Massa superficiale			Ms [kg/m ²]	283
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)			φ [h]	22,48		Resistenza termica totale			Rt [m ² K/W]	6,281
Trasmittanza termica periodica			Yie [W/m ² K]	0,002		Trasmittanza			U [W/m ² K]	0,159
Ammetenza termica lato interno			Yii [W/m ² K], [h]	1,83	2,15	Conduttanza			C [W/m ² K]	0,164
Ammetenza termica lato esterno			Yee [W/m ² K], [h]	0,80	4,17	Capacità termica areica			Cta [kJ/m ² K]	280
Capacità termica areica lato interno			k1 [kJ/m ² K]	25,1	31,0	Costante di tempo			τ [h]	488
Capacità termica areica lato esterno			k2 [kJ/m ² K]	11,0	11,2					
Fattore di smorzamento superficiale interno										
Parete disperdente			fsd [-]	0,762	0,895					
Parete interna			fsi [-]	0,763	0,896					

Tabella 14

- come solaio di base, un pacchetto costituito da una soletta di calcestruzzo armato di spessore 20 cm, seguito da un massetto per gli impianti di spessore 10 cm, uno strato di isolamento termico dallo spessore di 8 cm e infine, un ulteriore massetto alleggerito di spessore 5 cm. Come in precedenza, è stato considerato il solaio di base come adiabatico. La struttura è stata comunque

modellata nel programma, in quanto influenza il comportamento dinamico dell'edificio.

- come solaio di copertura, un pacchetto costituito da un solaio in latero-cemento dallo spessore di 25 cm, uno strato di isolante di spessore 14 cm, massetto cellulare di 5 cm, un'intercapedine d'aria di 2,5 cm e una copertura in tegole di laterizio.

1) Scegliere il tipo di componente edilizio				2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)				24					
Chiusura orizzontale (flusso ascendente)				Periodo delle variazioni termiche T		[sec]	86400						
				Resistenza termica sup interna Rsi		[m ² K/W]	0,10						
				Resistenza termica sup esterna Rse		[m ² K/W]	0,04						
Descrizione degli strati			Spessore (s) [m]	Conduttività termica (l) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (p) [Kg/m ³]	Resistenza termica aria [m ² K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m ² k/w]		
Rsi	Aria	Strato laminare interno									0,100		
1		Intonaco	0,015	0,900		1000	1800		0,117	0,128	0,017		
2		Pignatta	0,200	0,350		840	600		0,138	1,447	0,571		
3		Soletta CLS armato	0,050	1,800		1000	2500		0,141	0,355	0,028		
4		Isolante XPS	0,140	0,036		1200	30		0,166	0,844	3,889		
6		Massetto cellulare	0,050	0,170		1000	500		0,097	0,517	0,294		
10		Intercapedine d'aria	0,025					0,180	-	-	0,180		
11		Tegole	0,020	0,350		840	600		0,138	0,145	0,057		
Rse		Strato laminare esterno									0,040		
Spessore totale componente [cm]			50,00		Resistenza termica totale [m ² K/W]			5,176					
http://www.mygreenbuildings.org				RISULTATI				2010 @ Ing. Andrea Ursini Casalena					
Regime periodico stabilizzato						T = 24 ore		Regime stazionario					
Fattore di decremento (attenuazione)			fd	[-]	0,092		Massa superficiale			Ms	[kg/m ²]	313	
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)			φ	[h]	13,00		Resistenza termica totale			Rt	[m ² K/W]	5,176	
Trasmittanza termica periodica			Yie	[W/m ² K]	0,018		Trasmittanza			U	[W/m ² K]	0,193	
Ammettenza termica lato interno			Yii	[W/m ² K] , [h]	3,61		2,63	Conduttanza			C	[W/m ² K]	0,199
Ammettenza termica lato esterno			Yee	[W/m ² K] , [h]	2,03		3,88	Capacità termica areica			Cta	[kJ/m ² K]	293
Capacità termica areica lato interno			k1	[kJ/m ² K]	49,8		65,9	Costante di tempo			τ	[h]	421
Capacità termica areica lato esterno			k2	[kJ/m ² K]	28,0		29,3						
Fattore di smorzamento superficiale interno													
<i>Parete disperdente</i>			fsd	[-]	0,639		0,797						
<i>Parete interna</i>			fsi	[-]	0,638		0,796						

Tabella 15

8.2.3. Prestazione involucro trasparente

La componente vetrata di un edificio risulta fondamentale per il benessere interno degli occupanti e per il soddisfacimento dei requisiti energetici di un edificio.

Un primo aspetto fondamentale per il soddisfacimento del comfort termico riguarda il range di frequenza d'onda che il vetro lascia passare attraverso la sua struttura. Tutti i corpi con una temperatura superiore a 0 gradi kelvin emettono radiazioni elettromagnetiche in uno spettro continuo.

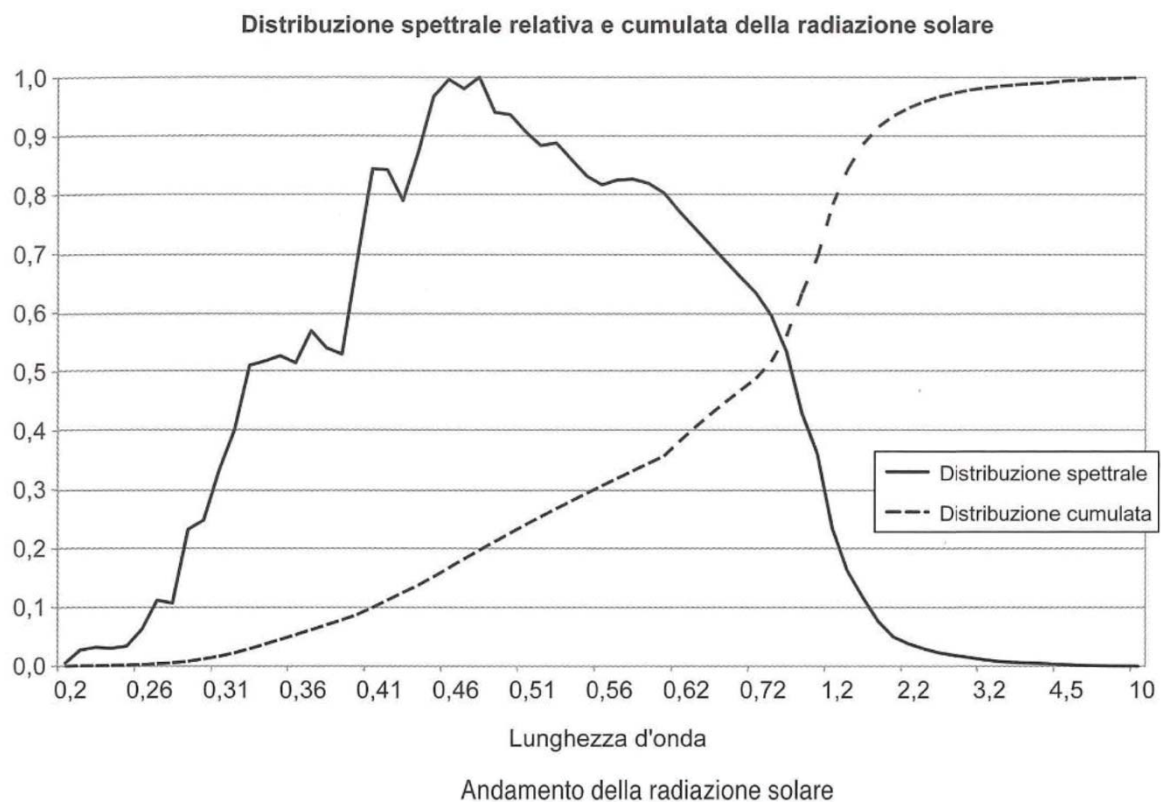


Figura 12

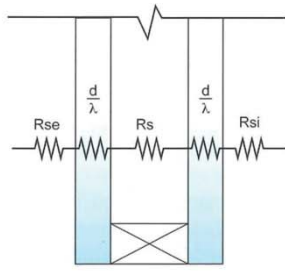
Lo spettro di emissione solare può essere suddiviso in 3 range:

- 1) 0 – 0,3 μm range dell'ultravioletto;

- 2) 0,3 – 2 μm range del visibile;
- 3) da 2 μm in poi range dell'infrarossi.

La parte di radiazione solare ricadente all'interno del range degli ultravioletti risulta dannosa per l'essere umano, quindi il vetro deve garantire una schermatura per queste lunghezze d'onda, ma al tempo stesso risulta essenziale che sia in grado di lasciar filtrare il maggior quantitativo di luce possibile.

Al fine di implementare le caratteristiche energetiche di un edificio, il vetro singolo non risulterebbe in grado di soddisfare gli standard odierni. Negli ultimi decenni si è sempre più esteso l'utilizzo delle vetrate doppie, le quali riescono a ridurre la trasmittanza termica della vetrata. Negli ultimi anni inoltre, si sono sviluppate le tecniche di "coating", consistenti nel realizzare dei depositi metallici sulle superfici dei vetri, riducendone l'emissività. In funzione della posizione del film di ossidi metallici sulla superficie vetrata si individuano vetri a controllo solare (riducono la penetrazione dell'energia solare all'interno dell'edificio), o bassoemissivi (riducono la fuoriuscita dalla struttura della radiazione solare incidente sulle superfici interne). Il calcolo della trasmittanza termica delle vetrate avviene come per le strutture opache in cui è presente un'intercapedine d'aria:



$$U_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum_j R_{sj} + \frac{1}{h_e}}$$

Figura 13

Nella presente sperimentazione, sempre con il fine di realizzare un'analisi che risulti esemplificativa degli edifici di nuova costruzione, si sono presi in considerazione i limiti di trasmittanza termica delle vetrate per la zona climatica di Ancona, $U = 2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

8.2.4. Caratteristiche involucro trasparente

Nell'edificio standard sono state utilizzate delle classiche finestre con doppio vetro e intercapedine d'aria, aventi delle caratteristiche termiche che rispettino le prescrizioni normative su esposte. In particolare, è stata utilizzata una finestra a controllo solare 6 – 10 – 6, avente la prima lastra un coating interno e la seconda lastra chiara di spessore 4 mm, separate da un'intercapedine di 10 mm. La finestra risulta installata su un telaio in alluminio con taglio termico. Le proprietà termiche della struttura vetrata sono visibili nella cattura del software in cui è stata modellata.

Per l'edificio fortemente isolato invece, sono state utilizzate delle finestre con triplo vetro e intercapedini con una concentrazione di Argon pari al 90%. La finestra utilizzata è del tipo 6 – 10 – 6 – 10 – 6, con tre lastre da 6 mm e due intercapedini da

10 mm. Inoltre, essendo l'edificio caso studio fortemente esposto alla radiazione solare, soffre di surriscaldamento estivo, perciò è stata utilizzata una finestra a controllo solare.

General	
Name	Vetro 6-10-6
Description	
Source	
Category	Project
Region	ITALY
Colour	
Definition method	
Definition method	1-Material layers
Layers	
Number layers	2
Outermost pane	
Pane type	Generic LoE CLEAR 6MM
Flip layer	<input type="checkbox"/>
Window gas 1	
Window gas type	AIR 10MM
Innermost pane	
Radiance Daylighting	

Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,568
Direct solar transmission	0,474
Light transmission	0,745
U-value (ISO 10292/ EN 673) (W/m ² -K)	1,937
U-Value (W/m²-K)	1,882

General

Name Triplo vetro 4-10-4-10-4

Description

Source

Category Triple

Region General

Colour

Definition method

Definition method 1-Material layers

Layers

Number layers 3

Outermost pane

Pane type 4 mm controllo solare

Flip layer

Window gas 1

Window gas type ARGON 10MM

Pane 2

Pane type Chiaro

Flip layer

Window gas 2

Window gas type ARGON 10MM

Innermost pane

Pane type Chiaro

Flip layer

Radiance Daylighting

Calculated Values

Total solar transmission (SHGC)	0.448
Direct solar transmission	0.28
Light transmission	0.453
U-value (ISO 10292/ EN 673) (W/m ² -K)	1.001
U-Value (W/m²-K)	0.982

8.2.5. Ponti termici

Al fine di realizzare una valutazione dettagliata del consumo energetico di un manufatto, risulta indispensabile tenere in considerazione l'apporto dovuto alla presenza dei ponti termici.

Il flusso termico, come nel caso dell'energia elettrica, tende a fluire nei percorsi in cui incontra una minor resistenza. I ponti termici si presentano proprio nelle zone dell'involucro in cui si hanno dei materiali con caratteristiche termiche inferiori. Questi inoltre, possono essere generati da una variazione di forma o da una variazione di materiale.

Nella presente tesi è stato possibile escludere dalla modellazione una valutazione dei ponti termici, in quanto l'obiettivo dell'analisi energetica eseguita sull'edificio in esame punta ad una valutazione della percentuale di risparmio energetico in funzione dei diversi set-point dei sistemi di climatizzazione. Essendo quindi una valutazione comparativa, l'assenza dei ponti termici nel modello non influenza i risultati finali.

9. Modellazione

Nella presente parte, si è proceduto a realizzare un modello simulativo del laboratorio in esame, al fine di effettuare delle simulazioni dinamiche degli ambienti, in modo tale da ottenere delle valutazioni riguardanti il dispendio energetico di un edificio al variare di diversi set-point di temperatura e contemporaneamente l'andamento delle ore di discomfort degli occupanti in funzione di diversi profili occupazionali.

Questa fase di studio si pone quindi come obiettivo, la valutazione dell'utilizzo dei parametri dinamici occupazionali come input per la gestione del sistema HVAC, verificandone i possibili vantaggi sia dal punto di vista energivoro che di comfort. Lo studio punta anche a valutare come varino i possibili vantaggi della gestione dinamica di un sistema HVAC anche in funzione delle diverse temperature di set-point, in quanto, risulta noto che fissate le caratteristiche termiche di un edificio, il dispendio energetico aumenta con l'incremento del set-point della temperatura e al contrario il comfort ambientale diminuisce al decrescere del set-point.

9.1. Introduzione DesignBuilder

Il DesignBuilder è uno strumento software di simulazione energetica dinamica e fluidodinamica con motore EnergyPlus, utilizzato per modellare il consumo di energia, il riscaldamento, il raffreddamento, la ventilazione, l'illuminazione e l'uso di acqua negli edifici.

Alcune delle notevoli caratteristiche e capacità del motore EnergyPlus includono:

- Soluzione integrata e simultanea delle condizioni della zona termica e della risposta del sistema HVAC, che non presuppone che il sistema HVAC sia in grado di soddisfare i carichi di zona e di simulare spazi non condizionati.
- Soluzione basata sul bilancio termico di effetti radianti e convettivi che producono temperature termiche superficiali e calcoli di condensa.
- Fasi temporali sub-orarie, definibili dall'utente per l'interazione tra zone termiche e ambiente; con fasce orarie variate automaticamente per le interazioni tra zone termiche e sistemi HVAC. Ciò consente a EnergyPlus di modellare sistemi con dinamiche rapide e al contempo di scambiare la velocità di simulazione per precisione.
- Modello combinato di trasferimento di calore e massa che tiene conto del movimento dell'aria tra le zone.
- Modelli di oscurazione delle finestre avanzati tra cui tapparelle controllabili, vetrate elettrocromatiche e bilanci termici strato per strato, che calcolano l'energia solare assorbita dai vetri delle finestre.
- Calcoli dell'illuminazione e dell'abbagliamento per riportare il comfort visivo e gestire i controlli dell'illuminazione.
- HVAC basato su componenti che supportano configurazioni di sistema sia standard che nuove.
- Numerose strategie HVAC e di controllo dell'illuminazione integrate e un sistema di script di runtime estensibile per il controllo definito dall'utente.

- Importazione ed esportazione dell'interfaccia Mockup funzionale per la co-simulazione con altri motori.
- Riepilogo standard e report dettagliati sull'output, nonché report definibili dall'utente con risoluzione temporale selezionabile da annuale a sub-oraria, il tutto con moltiplicatori di energia.

Tra tutte le caratteristiche su elencate di EnergyPlus, risultano fondamentali per le valutazioni del presente studio la possibilità di considerare nella simulazione dinamica dei profili temporali dell'occupazione dell'edificio e la possibilità di ottenere un report diretto sulle condizioni di comfort degli occupanti.

Inoltre, questo programma grazie all'implementazione di DesignBuilder permette la realizzazione al suo interno di un modello tridimensionale, come si è mostrato nel capitolo successivo.

9.2. Impostazione modello

Nel presente capitolo si definisce la tecnica utilizzata per realizzare il modello tridimensionale sul software DesignBuilder.

Nella fase iniziale si è definito il template della località in cui sono stati inseriti tutti i dettagli geomorfologici del sito, tipo di terreno e il file climatico della località.

Per rendere più semplice la fase di modellazione si è proceduto a realizzare una pianta del laboratorio su Autocad, da qui è stato possibile esportarla in un file .dxf e infine, importarla nel programma di simulazione energetico. Una volta inserita la pianta

come riferimento, si è proceduto a modellare in ordine il solaio di base, le tamponature, il solaio di copertura, le finestre e infine le porte. Di seguito si è riportata una schermata esemplificativa del modello realizzato.

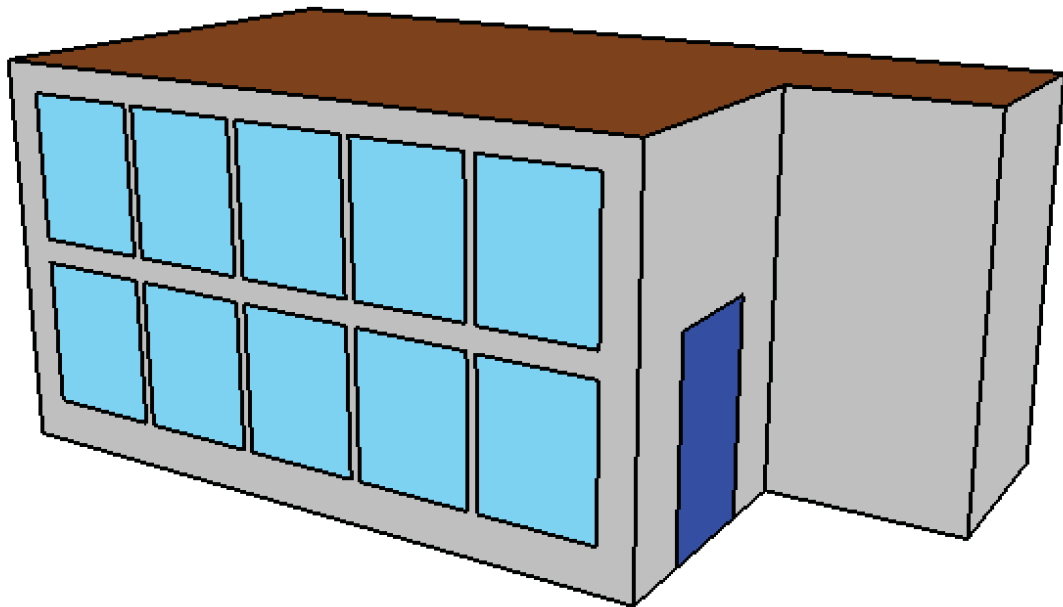


Figura 14

9.3. Profili occupazionali

Al fine di raggiungere gli obiettivi di riduzione al minimo del consumo di energia dell'edificio e delle ore di disagio degli occupanti, è necessario sviluppare e incapsulare un modello dettagliato di simulazione energetica dell'edificio. Poiché il funzionamento dei sistemi di climatizzazione dipende fortemente dalla presenza di occupanti, il modello dovrebbe basarsi su informazioni riguardanti la reale occupazione degli ambienti. Avere una visione attendibile delle informazioni sull'occupazione è particolarmente cruciale quando si applicano strategie di controllo negli spazi condivisi.

Nel primo modello è stato implementato un profilo occupazionale standard per un ambiente ad uso ufficio, ovvero è stata definita un'occupazione costante pari al 100% dei soggetti ospitabili dal lunedì al venerdì, dalle 8:00 alle 20:00.

Nel secondo modello invece, è stato inserito un modello di occupazione dinamico. Non essendo in possesso dei dati relativi all'occupazione dell'edificio preso in esame, poiché la definizione di un modello di occupazione dinamica deriva da una lunga osservazione dell'occupazione degli spazi comuni, si è fatto riferimento ad un articolo scientifico basato sulla gestione microclimatica del sistema HVAC, in cui è fornito un profilo occupazionale generato dall'osservazione di un ambiente ad uso ufficio per un intero anno. I profili inseriti nel modello di simulazione energetica sono riportati di seguito.

OCCUPAZIONE STANDARD

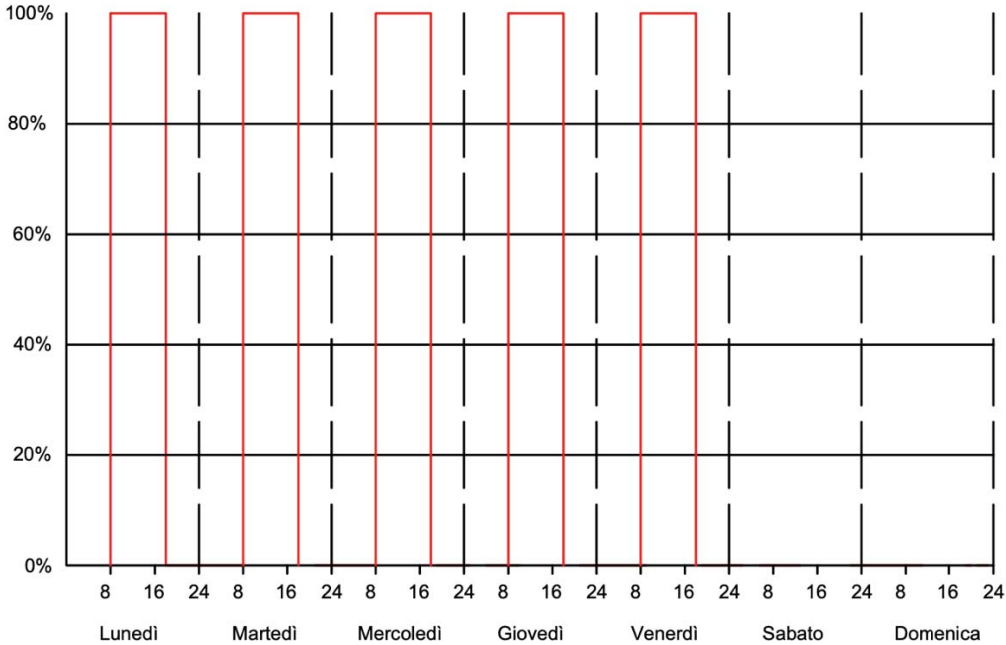
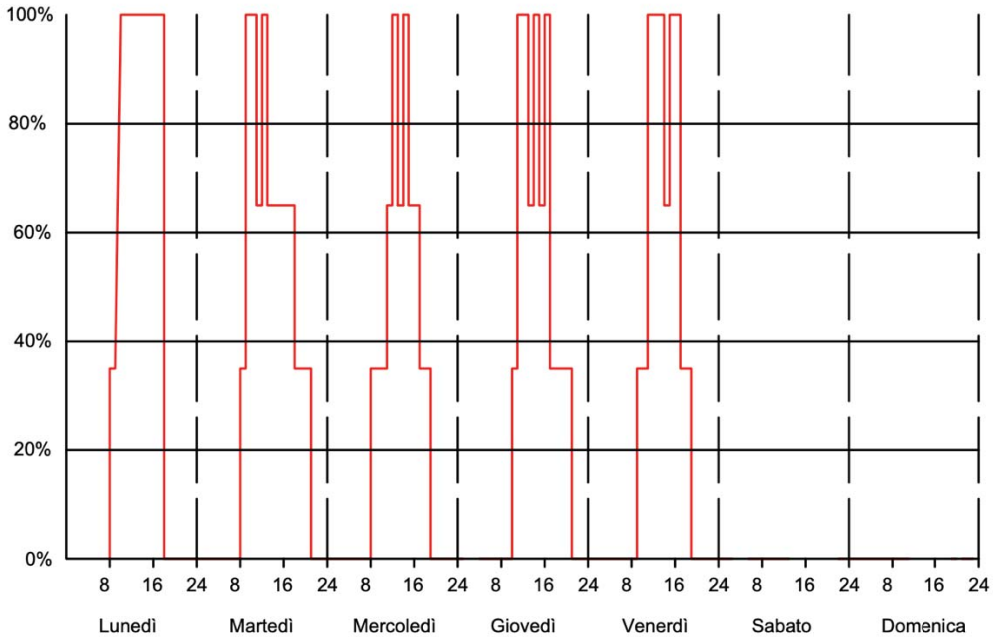


Figura 15

OCCUPAZIONE DIANMICA



9.4. Definizione parametri di calcolo

Al fine di definire in maniera compiuta il modello di calcolo è stato necessario determinare i parametri di:

- Occupazione;
- Attività;
- Abbigliamento;
- HVAC;
- Illuminazione;
- Attrezzatura da ufficio.

Tutti i parametri suddetti risultano essenziali al fine di realizzare un'analisi dettagliata dell'edificio.

Il modello presenta una superficie calpestabile di 23,1 mq e un volume di 92,4 mc.

Per la definizione del numero di occupanti presenti è stato inserito un valore standard di densità pari a 0,11 persone/mq.

Per quanto riguarda l'attività eseguita all'interno dell'ambiente, essendo un edificio ad uso ufficio è stata considerata un'attività standard, standing/walking, avente un tasso metabolico per persona pari a 123 W/persona.

Per la definizione del comfort degli occupanti risulta fondamentale precisare la tipologia di abbigliamento indossato. Nella presente simulazione sono stati

considerati dei generici abbigliamenti estivi e invernali, aventi rispettivamente un isolamento termico pari a 0,5 clo e 1,0 clo.

La gestione del sistema di Heating, Ventilation and Air Condition influenza notevolmente i consumi energetici.

Il sistema di riscaldamento invernale è stato definito come segue:

- Temperatura di set-point 20°C – 21°C – 22°C per i tre diversi modelli;
- Temperatura di set back 18°C;
- Gestione attivazione sistema HVAC coerente con il profilo occupazionale;
- Combustibile gas naturale con rendimento CoP di 0,85.

Il sistema di raffrescamento estivo è stato definito come segue:

- Temperatura di set-point 26°C – 25°C – 24°C per i tre diversi modelli;
- Temperatura di set back 28°C;
- Gestione attivazione sistema HVAC coerente con il profilo occupazionale;
- Alimentato da energia elettrica con rendimento ERR di 5,4.

Anche l'illuminazione determina variazioni per il consumo energetico dell'edificio.

Il sistema di illuminazione interno si basa sul consumo di energia elettrica, ma parte di questa energia viene ceduta all'ambiente sotto forma di calore. In particolare, il sistema definito nel modello, considera una densità di potenza normalizzata pari a 3,4 W/m²-100lux. Inoltre, la gestione del sistema di illuminazione è coerente con il profilo occupazionale.

Infine, è necessario valutare l'energia sensibile e latente prodotta dalle attrezzature da ufficio. In particolare, si assume una densità di potenza standard pari a 11,77 W/mq, con un andamento del funzionamento concorde con il profilo occupazionale.

9.5. Metodologia di calcolo

In questo studio, minimizzare le ore di disagio e ridurre il consumo energetico sono gli obiettivi finali del modello proposto, in modo da valutare la possibilità di considerare l'occupazione come parametro di input per la gestione dei sistemi HVAC. Il livello di soddisfazione degli occupanti riguardo alle condizioni termiche ambientali definisce il comfort termico degli occupanti. Numerosi modelli matematici sono stati proposti esplorando la correlazione tra le variabili di comfort termico, per prevedere la soddisfazione termica degli occupanti. Tra questi modelli, il metodo Graphic Comfort Zone suggerito dallo standard ASHRAE 55-2010 è stato utilizzato in questo studio per misurare le ore di disagio. Sulla base di questo metodo, il numero totale di ore di disagio viene calcolato in base al fatto che il rapporto di umidità e la temperatura operativa rientrino nelle regioni previste dalla norma. Queste regioni derivano dagli indici Predicted Mean Vote (PMV) e Predicted Percent Unsatisfied (PPD) sviluppati da Fanger. Secondo ASHRAE 55, l'indice PMV tra +0,5 e -0,5 può essere utilizzato come indicazione dell'ambiente termicamente confortevole quando si impostano le temperature di raffreddamento e riscaldamento della zona.

La funzione dell'energia (E) è definita come una combinazione del consumo di energia del sistema HVAC (E_H), che è la somma dell'energia di raffreddamento (CE) di riscaldamento (HE) e di illuminazione (E_L) come mostrato di seguito:

$$E = E_H + E_L$$

$$E_H = C_E + HE$$

Il carico di riscaldamento/raffreddamento del sistema HVAC dipende dai guadagni di calore interni (IHG), incluso i guadagni derivanti dagli occupanti (IHG_{occ}), dall'illuminazione ($IHGl$) e dalle attrezzature (IHG_{eq}). L'energia di raffreddamento (CE) viene calcolata usando l'equazione seguente:

$$C_E = \text{cooling load} / CoP$$

dove CoP è il coefficiente di prestazione del sistema.

Concentrandosi sull'occupazione, la somma dei guadagni di calore latente (QL_{occ}) e sensibile (QS_{occ}) compreso il guadagno di calore derivante dall'occupazione sono calcolati come segue:

$$QL_{occ} = Count_z \times LHG_{occ}$$

$$QS_{occ} = Count_z \times SHG_{occ} \times CLF$$

Dove $Count_z$ è il numero di occupanti in ciascuna fase temporale t nella zona z . LHG_{occ} e SHG_{occ} sono il guadagno di calore latente e sensibile per persona e per tipo di attività svolta nella zona, e sono derivati dagli standard. Una parte del calore sensibile generato dagli occupanti viene assorbito dall'ambiente circostante e quindi rilasciato gradualmente nella zona. Per riflettere il rilascio graduale dell'energia

nell'ambiente, viene considerato un fattore di carico di raffreddamento (*CLF*) nel calcolo di *Q_{Socc}*, che ne comporta un ritardo. Questo fattore è ottenuto dagli standard (ASHRAE). Per il calcolo di *LHG_{occ}*, il fattore non risulta necessario, poiché sommato istantaneamente alla zona. Lo stesso concetto viene utilizzato per il calcolo dell'energia di riscaldamento.

La potenza di illuminazione è calcolata come segue:

$$LP = \frac{LE \cdot I \cdot A}{100}$$

dove:

LP è la potenza di illuminazione (W);

LE è l'energia di illuminazione (W/m²/100lux);

I è il livello di illuminazione (lux);

A è l'area del piano (m²).

9.6. Definizione parametri di simulazione

Infine, sono stati definiti i parametri per la simulazione. In particolare, è stato impostato un intervallo di report degli output sub-orario, con un time step per ora pari a 6, in modo da ottenere dei report ad intervalli di 10 minuti. Infine, le opzioni di calcolo si sono basate sul controllo della temperatura operativa.

10. Risultati simulazioni energetiche – comfort

Nel presente capitolo vengono mostrati i risultati delle 12 simulazioni effettuate, con le rispettive tabelle riepilogative e di confronto.

10.1. Risultati edificio standard

In questi sotto-capitoli sono riportati i risultati delle simulazioni effettuate sui modelli con caratteristiche termiche standard.

10.1.1. Occupazione standard

Il primo modello esposto è riferito ad una occupazione di tipo standard, ovvero una tipologia di occupazione tipicamente utilizzata nelle pratiche progettuali. Riepilogando, il profilo occupazionale utilizzato nel presente modello, prevede una presenza costante pari al 100% dei possibili occupanti dal lunedì al venerdì dalle ore 8:00 alle ore 20:00.

I successivi modelli sono stati realizzati con 3 diversi valori di temperature di set-point per la gestione del riscaldamento e raffrescamento.

10.1.2. Set-point 20°C – 26°C

Nel primo modello sono state configurate delle temperature di riscaldamento e raffrescamento coerenti con i parametri normativi italiani, che richiedono appunto una temperatura massima per la gestione del sistema di riscaldamento pari a 20°C e 26°C per il sistema di raffrescamento.

Nella figura seguente è visibile l'andamento dei principali parametri durante l'arco dell'intero anno di simulazione. In particolare, nel primo grafico sono riportati gli

andamenti della temperatura dell'aria, temperatura media radiante, temperatura operativa e della temperatura esterna a bulbo secco. Il secondo grafico invece è riferito al bilancio energetico in cui sono mostrate le aliquote di energia cedute e assorbite dai vari componenti edilizi, dagli occupanti e dalle attrezzature da ufficio. Infine, nel terzo grafico è riportato l'andamento del rinnova d'aria, dato dalla somma dell'aliquota dovuta alla ventilazione meccanica, alla ventilazione naturale e alle infiltrazioni d'aria.



Figura 17

Nella seguente figura, oltre a riportare nuovamente gli andamenti delle temperature; nel secondo grafico è definita la Percentage of people dissatisfied (percentuale prevista di insoddisfatti) PPD secondo il metodo del Fanger; nel terzo è riportato l'andamento delle ore di discomfort degli occupanti; nel quarto invece, i risultati del Predicted Mean Vote (voto medio previsto) PMV.

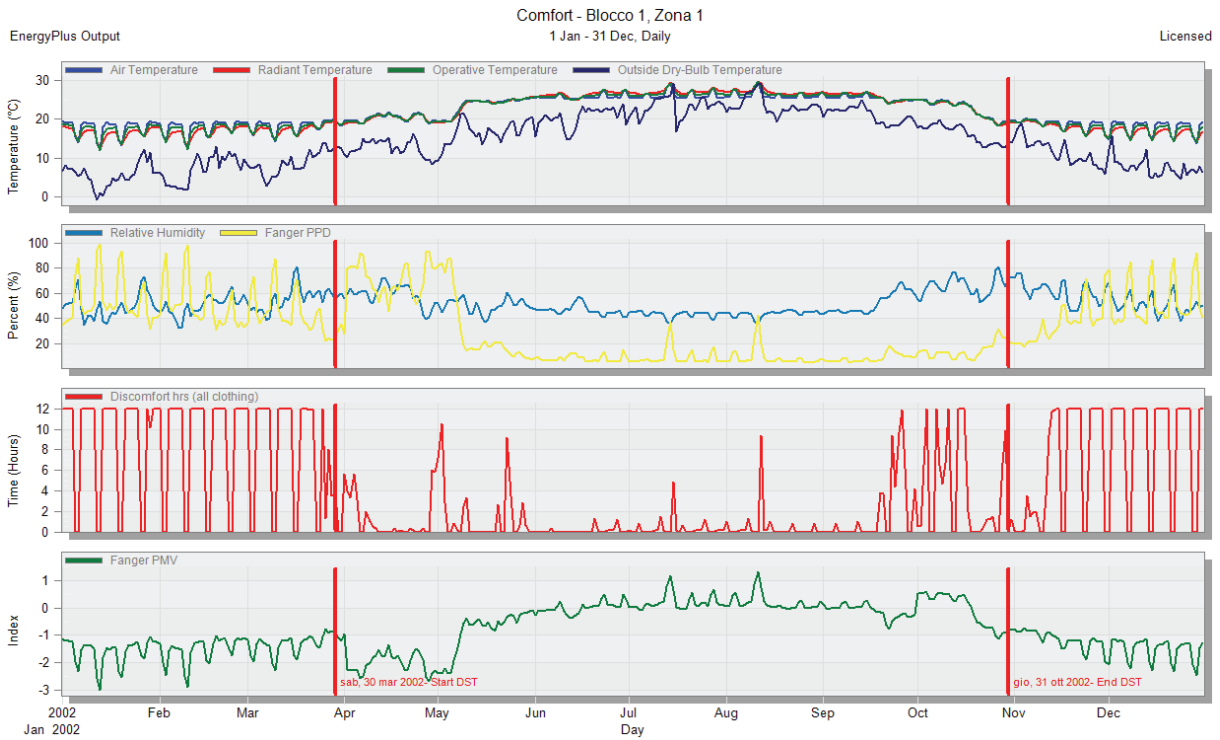


Figura 18

10.1.3. Set-point 21°C – 25°C

Nei successivi modelli si è proceduto a variare le temperature di set-point in modo da valutare la potenzialità di risparmio energetico e comfort termico di un sistema di gestione dinamico del HVAC basato sull'occupazione dell'ambiente. I grafici sottostanti sono riferiti a set-point di 21°C e 25°C.

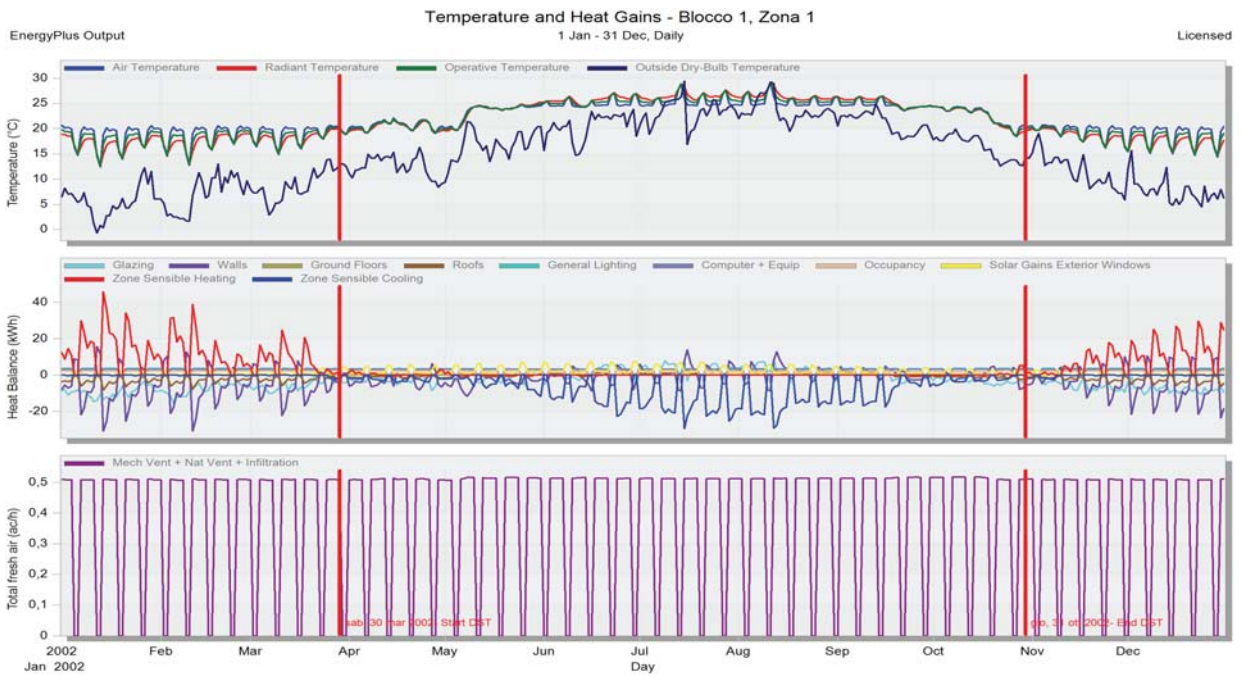


Figura 19

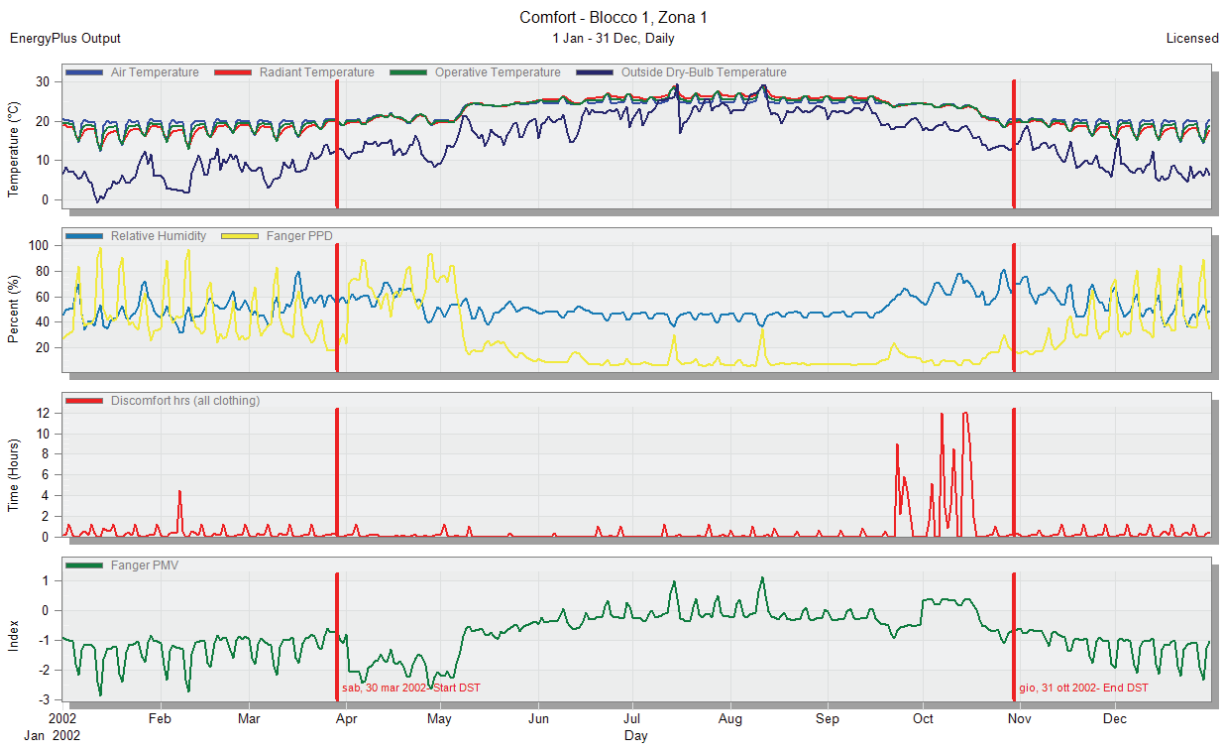


Figura 20

10.1.4. Set-point 22°C – 24°C

Infine, l'ultimo modello è stato realizzato considerando delle temperature di set-point pari a 22°C e 24°C.

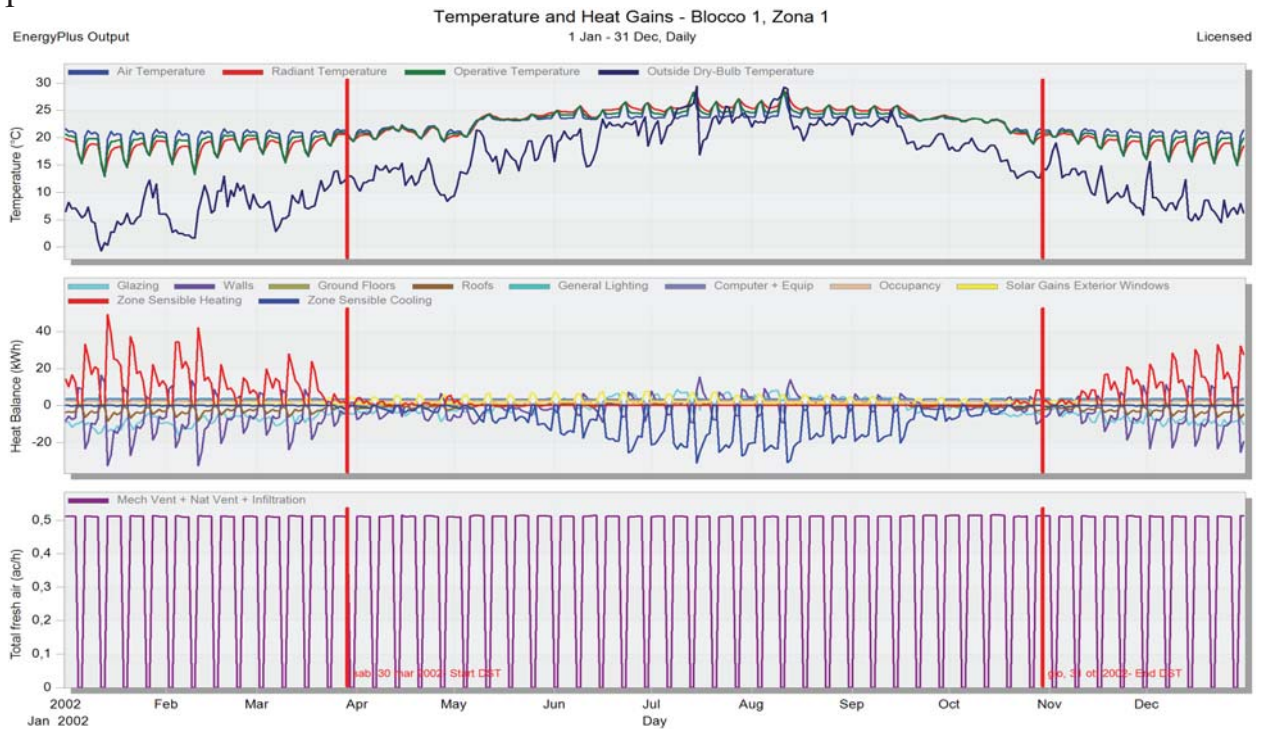


Figura 21

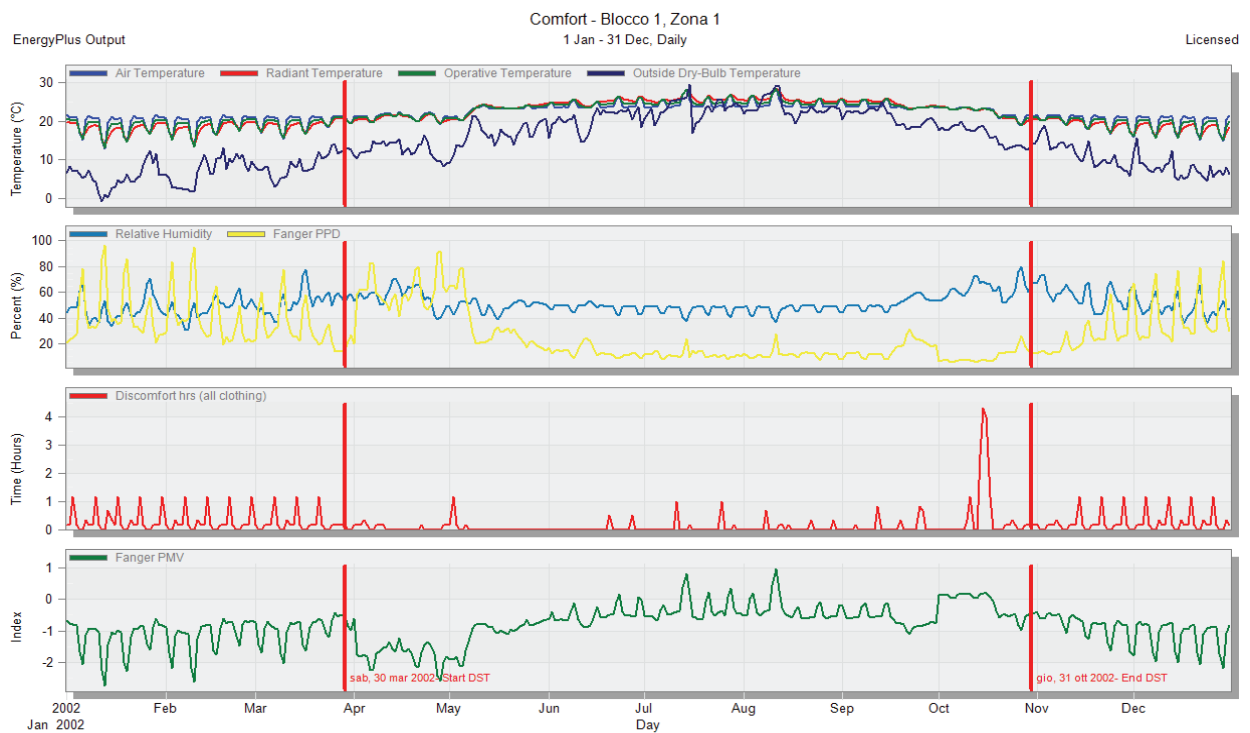


Figura 22

Tabella riassuntiva - Occupazione standard					
set-point [°C]	HEATING [kWh]	COOLING [kWh]	ILLUMINAZIONE [kWh]	ATTREZZATURA [kWh]	DISCOMFORT [h]
20 - 26	1442,9	1529,16	915,64	851,24	547,5
21 - 25	1706,92	1812,45	915,64	851,24	250
22 - 24	1998,45	2113,27	915,64	851,24	119,33

Tabella riassuntiva - Occupazione standard					
set-point [°C]	HEATING [kWh]	COOLING [kWh]	ILLUMINAZIONE [kWh]	ATTREZZATURA [kWh]	VARIAZIONE [%]
20 - 26	1442,9	1529,16	915,64	851,24	-
21 - 25	1706,92	1812,45	915,64	851,24	12%
22 - 24	1998,45	2113,27	915,64	851,24	24%

set-point [°C]	DISCOMFORT [h]	VARIAZIONE [%]
20 - 26	547,5	-
21 - 25	250	-54%
22 - 24	119,33	-78%

Tabella 16

Nelle tabelle sovrastanti è riportato un riepilogo delle quote di energia consumate dai vari sistemi presi in considerazione, e il valore delle ore di discomfort valutate secondo l'ASHRAE 55 del 2010.

In particolare, è visibile come il dispendio energetico aumenti in modo costante al crescere della temperatura di set-point invernale e al diminuire di quella estiva. L'energia richiesta dai sistemi di illuminazione e dalle attrezzature risulta invariata, in quanto dipendente unicamente dal profilo occupazionale. Mentre le ore di discomfort tendono a decrescere in modo non costante, poiché esse non risultano funzione unicamente della temperatura dell'aria, ma di molti altri fattori, come:

asimmetrie radianti, umidità relativa, velocità dell'aria, stratificazione della temperatura dell'aria e molto altro.

10.1.5. Occupazione dinamica

Le stesse considerazioni fatte per il modello ad occupazione standard vengono ripetute per il modello con occupazione dinamica, in cui è stata considerato un profilo di occupazione derivante dall'osservazione delle presenze durante l'arco di un intero anno.

Anche in questo caso sono stati realizzati 3 modelli con 3 diversi valori di temperature di set-point.

10.1.6. Set-point 20°C – 26°C

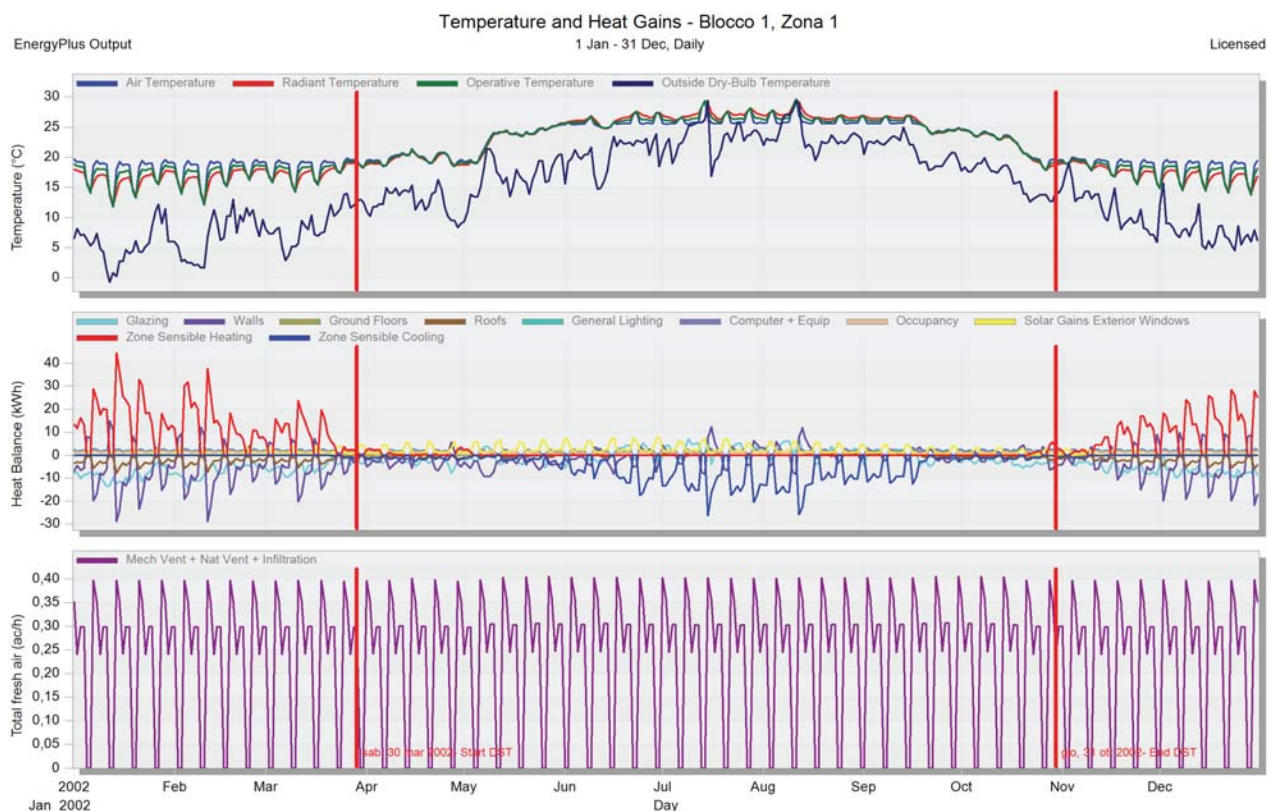


Figura 23

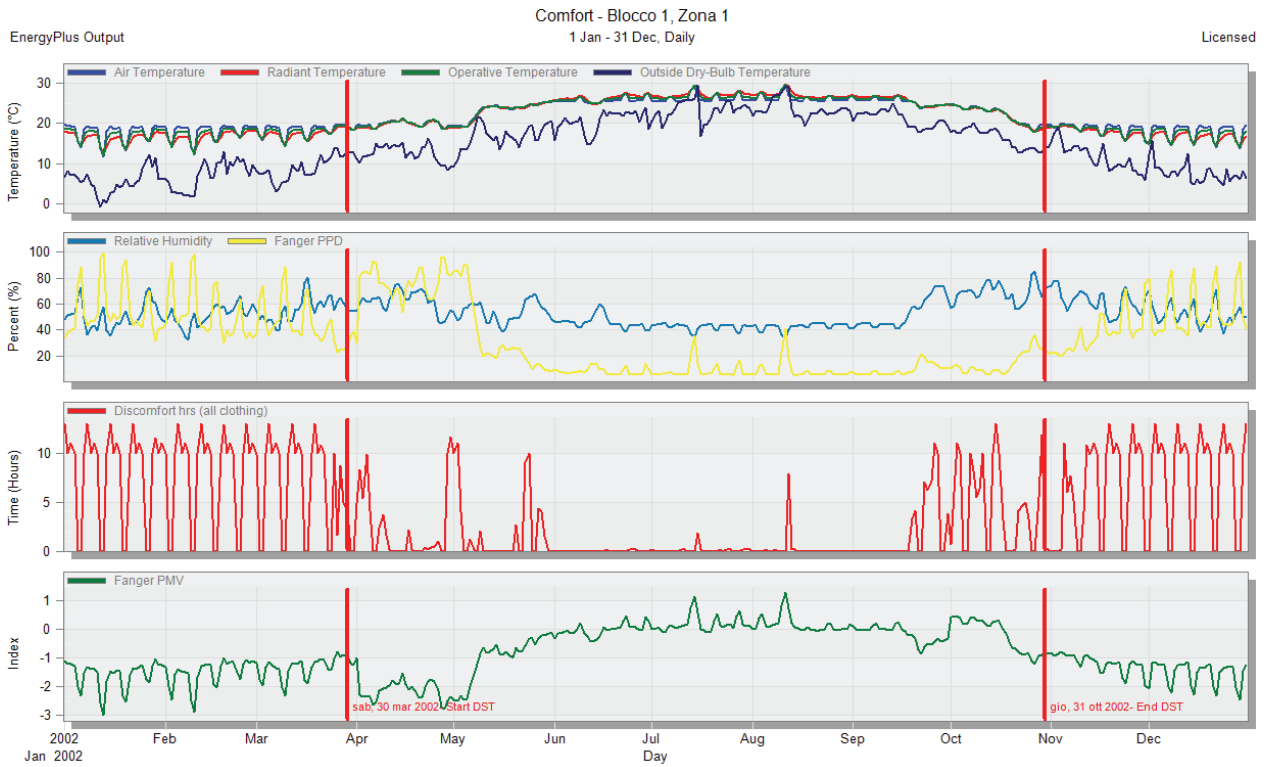


Figura 24

10.1.7. Set-point 21°C – 25°C

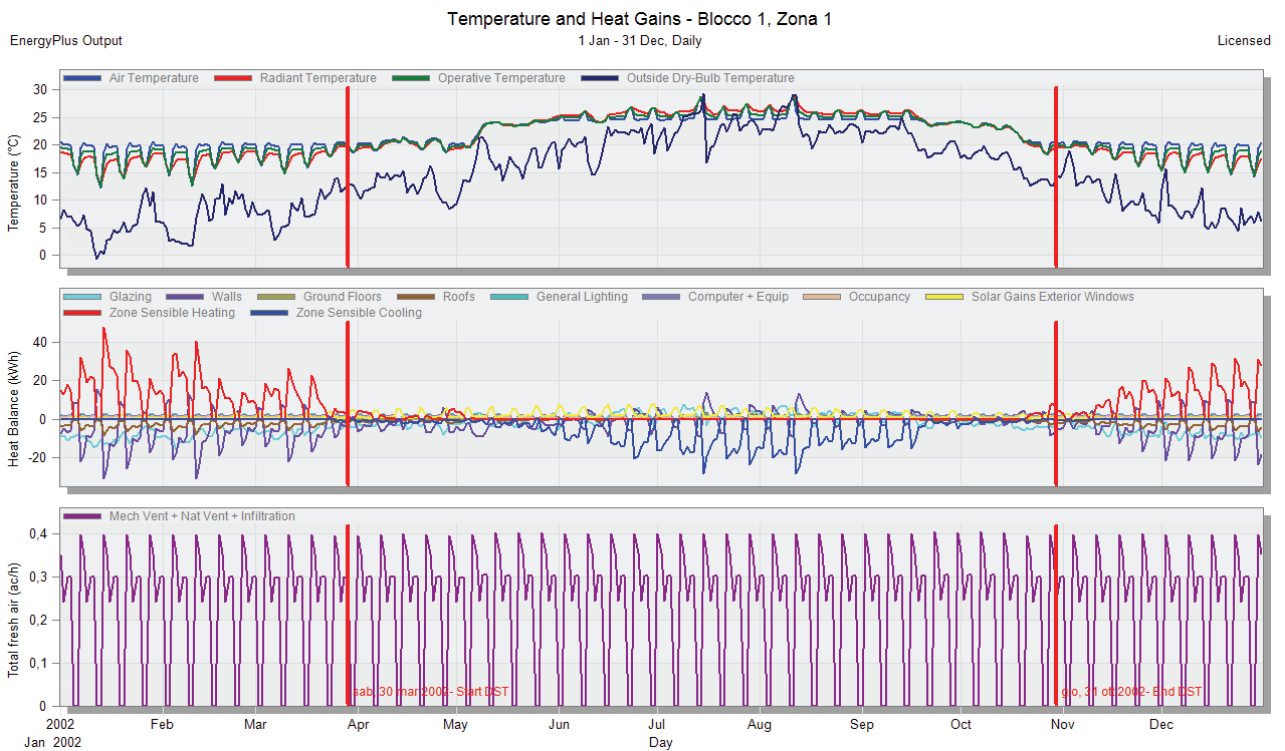


Figura 25

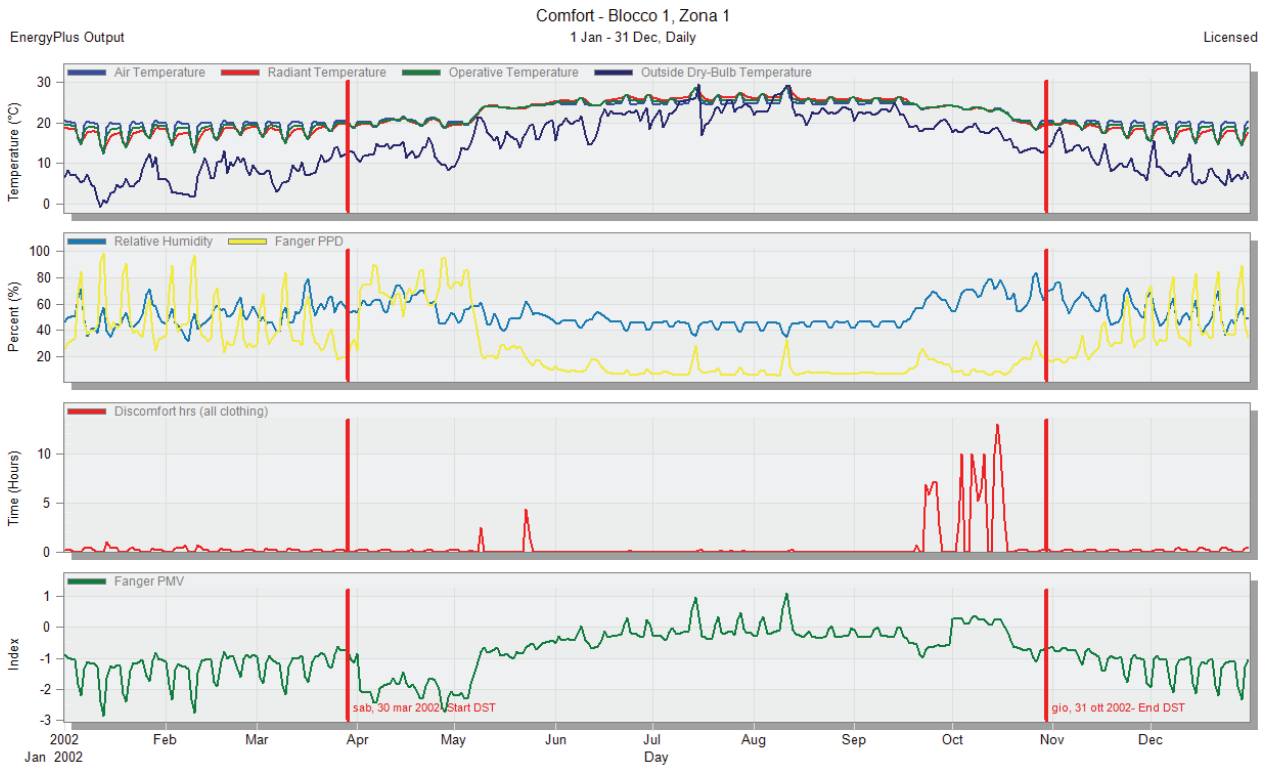


Figura 26

10.1.8. Set-point 22°C – 24°C

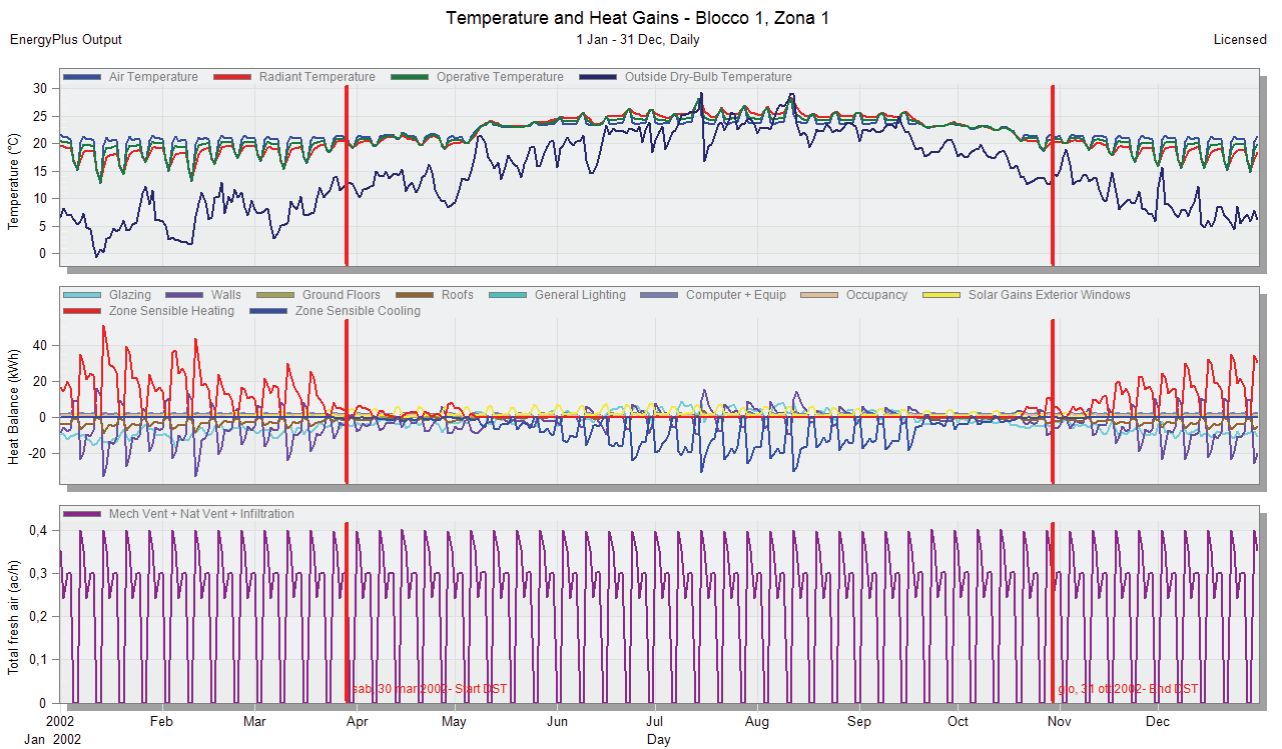


Figura 27

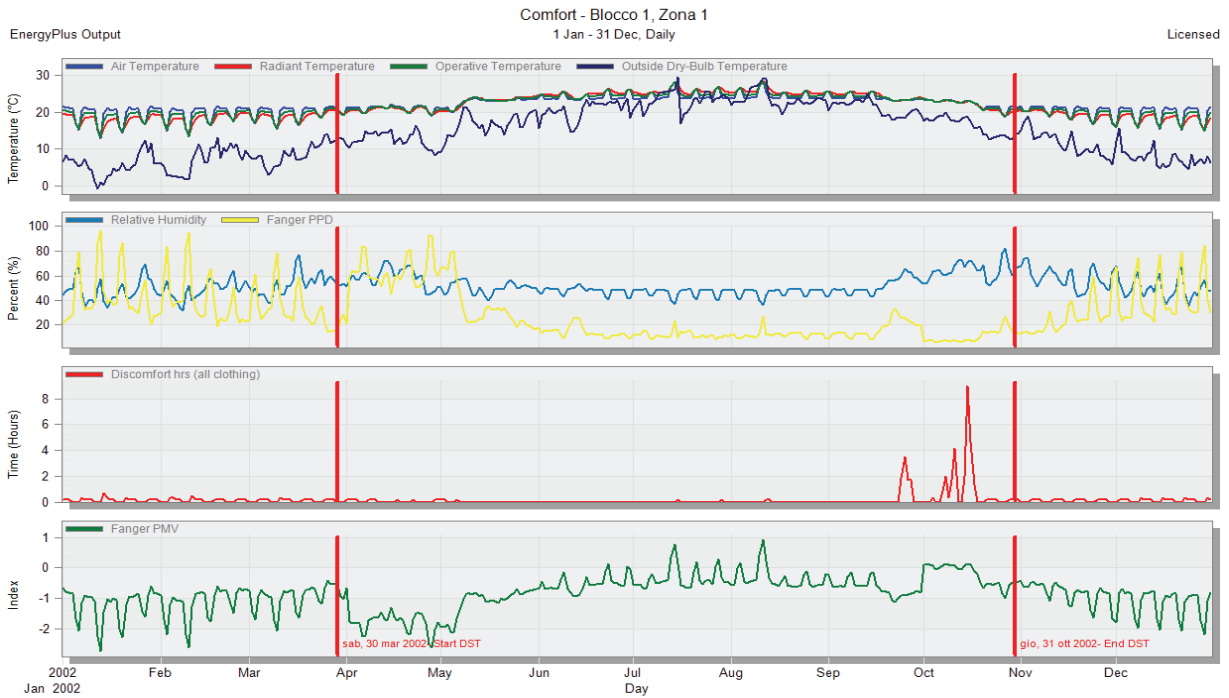


Figura 28

Tabella riassuntiva - Occupazione reale					
set-point [°C]	HEATING [kWh]	COOLING [kWh]	ILLUMINAZIONE [kWh]	ATTREZZATURA [kWh]	DISCOMFORT [h]
20 - 26	1761,34	1149,28	563,59	531,54	479,17
21 - 25	2044,74	1375,73	563,59	531,54	191,17
22 - 24	2351,67	1636,61	563,59	531,54	85,5

Tabella riassuntiva - Occupazione reale					
set-point [°C]	HEATING [kWh]	COOLING [kWh]	ILLUMINAZIONE [kWh]	ATTREZZATURA [kWh]	VARIAZIONE [%]
20 - 26	1761,34	1149,28	563,59	531,54	-
21 - 25	2044,74	1375,73	563,59	531,54	13%
22 - 24	2351,67	1636,61	563,59	531,54	27%

set-point [°C]	DISCOMFORT [h]	VARIAZIONE [%]
20 - 26	479,17	-
21 - 25	191,17	-60%
22 - 24	85,5	-82%

Tabella 17

Anche in questo caso possono essere dedotte le stesse considerazioni effettuate per il modello di simulazione con occupazione standard, ovvero una diminuzione circa costante del consumo energetico con la variazione dei set-point e un decremento non costante del discomfort termico.

10.1.9. Confronto edificio standard

set-point [°C]	OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	variazione [%]
20 - 26	547,5	479,17	-12,48%
21 - 25	250	191,17	-23,53%
22 - 24	119,33	85,5	-28,35%

Tabella 18

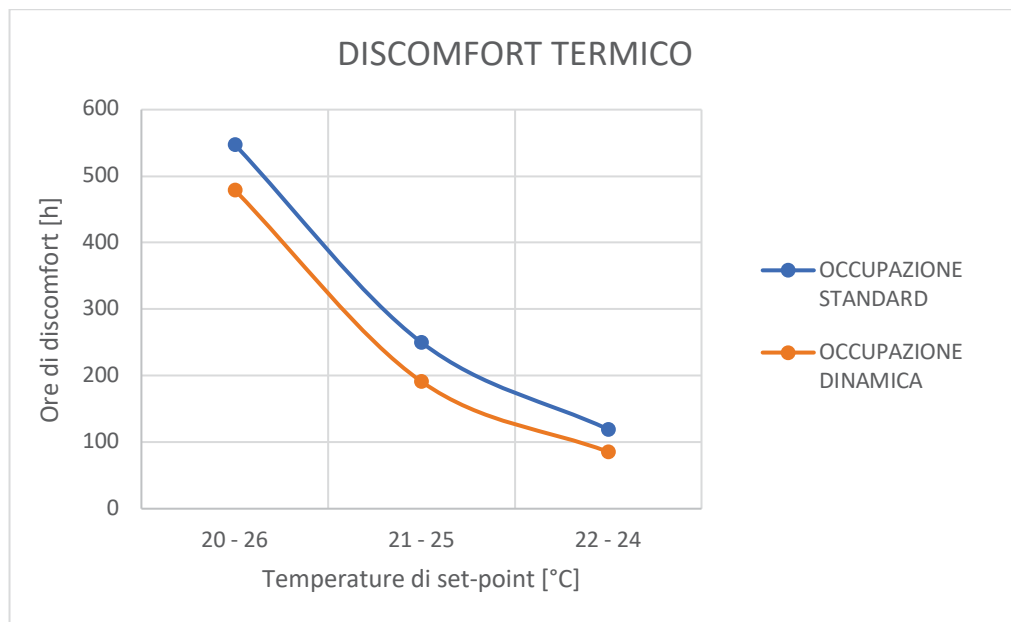


Figura 29

Nella figura 22 è subito visibile l'andamento non lineare delle ore di discomfort termico in funzione delle temperature di set-point. È evidente anche come il modello ad occupazione dinamica abbia un notevole incremento del comfort termico per dei valori di set-point da normativa, e come questo tende a diminuire con l'incremento e la diminuzione delle temperature di riscaldamento e raffrescamento.

HEATING [kWh]			
set-point [°C]	OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
20	1442,9	1761,34	22,07%
21	1706,92	2044,74	19,79%
22	1998,45	2351,67	17,67%

Tabella 19

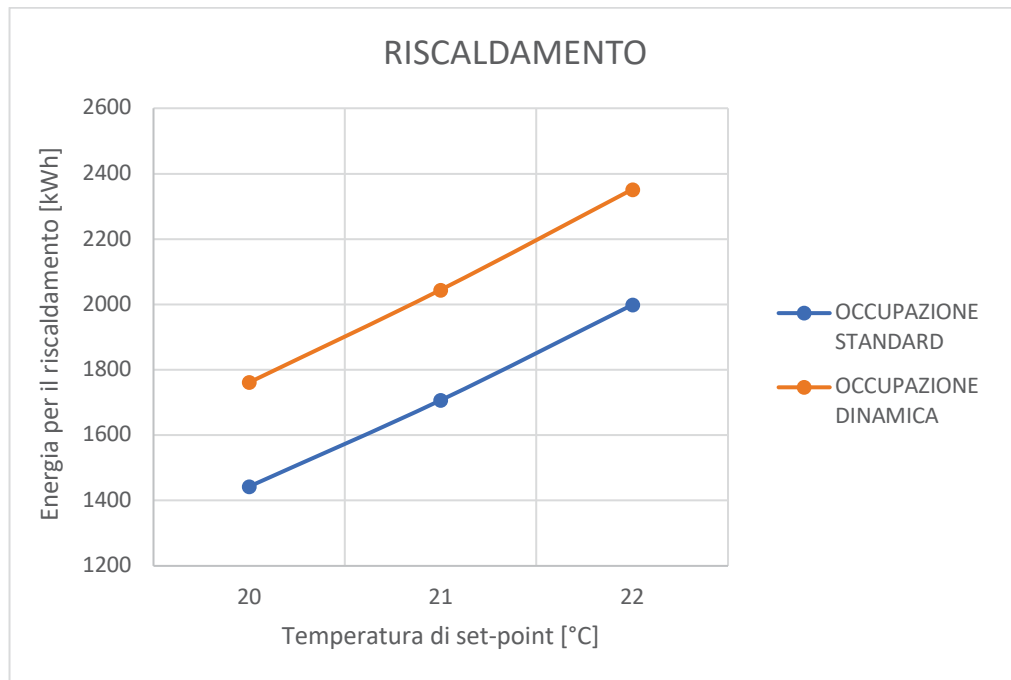


Figura 30

Nella figura 23, riferita all'energia necessaria per il riscaldamento invernale dell'edificio, si nota come l'incremento del consumo energetico sia pressoché costante con la temperatura. Si osserva anche come il consumo energetico con occupazione dinamica risulti superiore a quello con un profilo di occupazione standard. Questo è legato principalmente all'energia latente e sensibile che il corpo umano cede verso l'ambiente, e all'energia dell'attrezzatura e dell'illuminazione (coerente con il profilo occupazionale) anch'essa ceduta all'ambiente, che compensa la quota di energia richiesta per il riscaldamento invernale.

COOLING [kWh]			
set-point [°C]	OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
26	1529,16	1149,28	-24,84%
25	1812,45	1375,73	-24,10%
24	2113,27	1636,61	-22,56%

Tabella 20

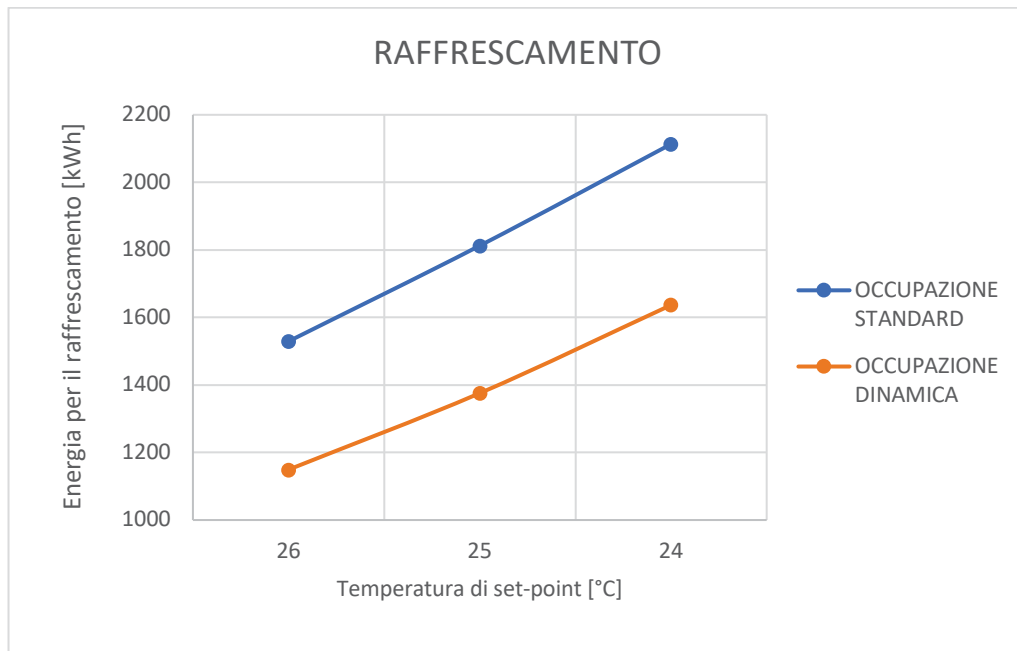


Figura 31

Il discorso invece si inverte per il raffrescamento estivo, in quanto l'energia ceduta all'ambiente da parte degli occupanti, dalle attrezzature e dal sistema di illuminazione aggrava la quota di energia necessaria al raffrescamento.

ENERGIA ELETTRICA ILLUMINAZIONE [kWh]		
OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
915,64	563,59	-38,45%

ENERGIA ELETTRICA ATTREZZATURA [kWh]		
OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
851,24	531,54	-37,56%

Tabella 21

TOTAL ENERGY [kWh]			
set-point [°C]	OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
20 - 26	4738,94	4005,75	-15,47%
21 - 25	5286,25	4515,6	-14,58%
22 - 24	5878,6	5083,41	-13,53%

Tabella 22

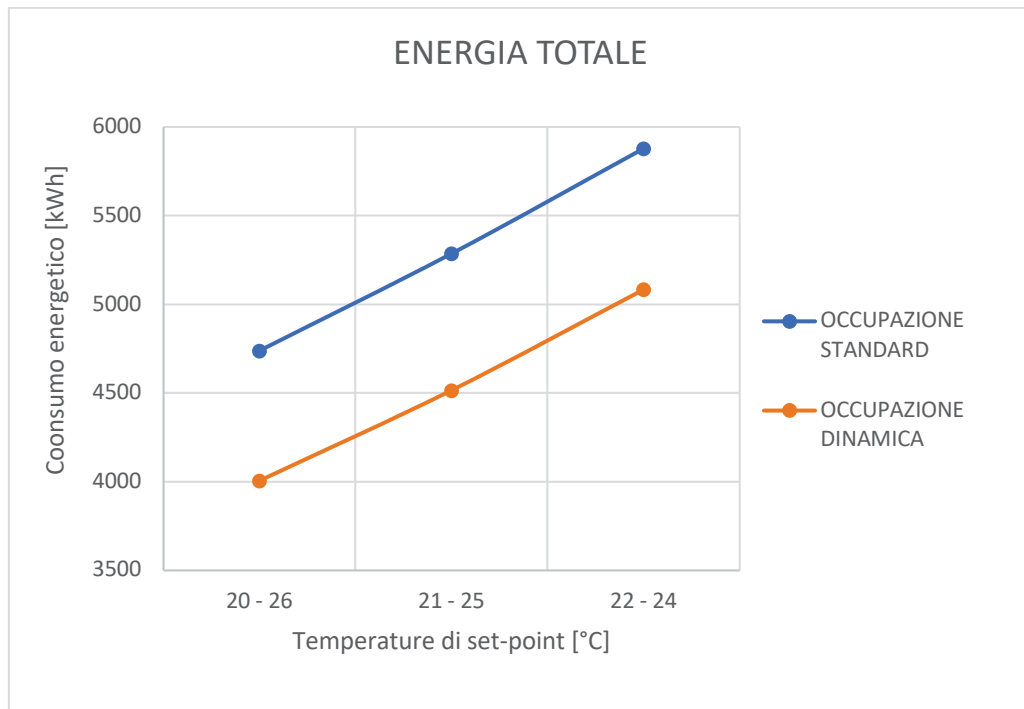


Figura 32

In conclusione, dal grafico soprastante è possibile evincere un notevole risparmio energetico in funzione del profilo occupazionale dell'edificio.

10.2. Risultati edificio fortemente isolato

Le seguenti analisi sono realizzate sul modello fortemente isolato come per i casi sovrastanti.

10.2.1. Occupazione standard

10.2.2. Set-point 20°C – 26°C

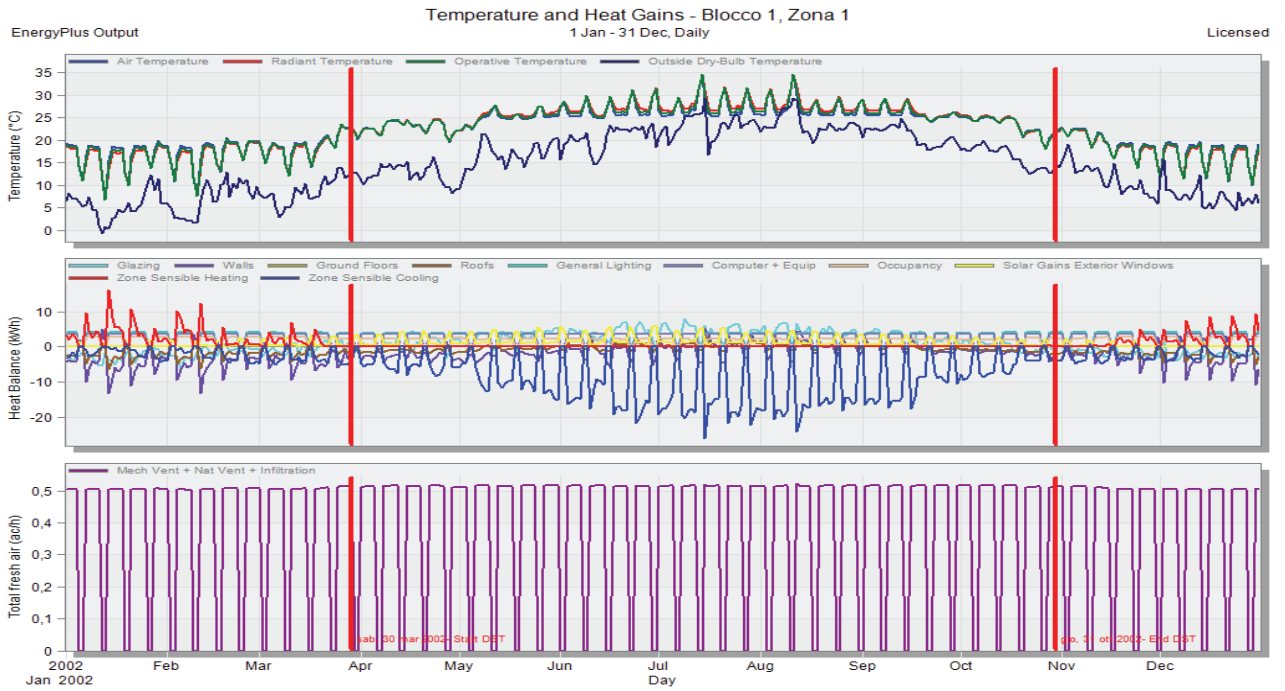


Figura 33

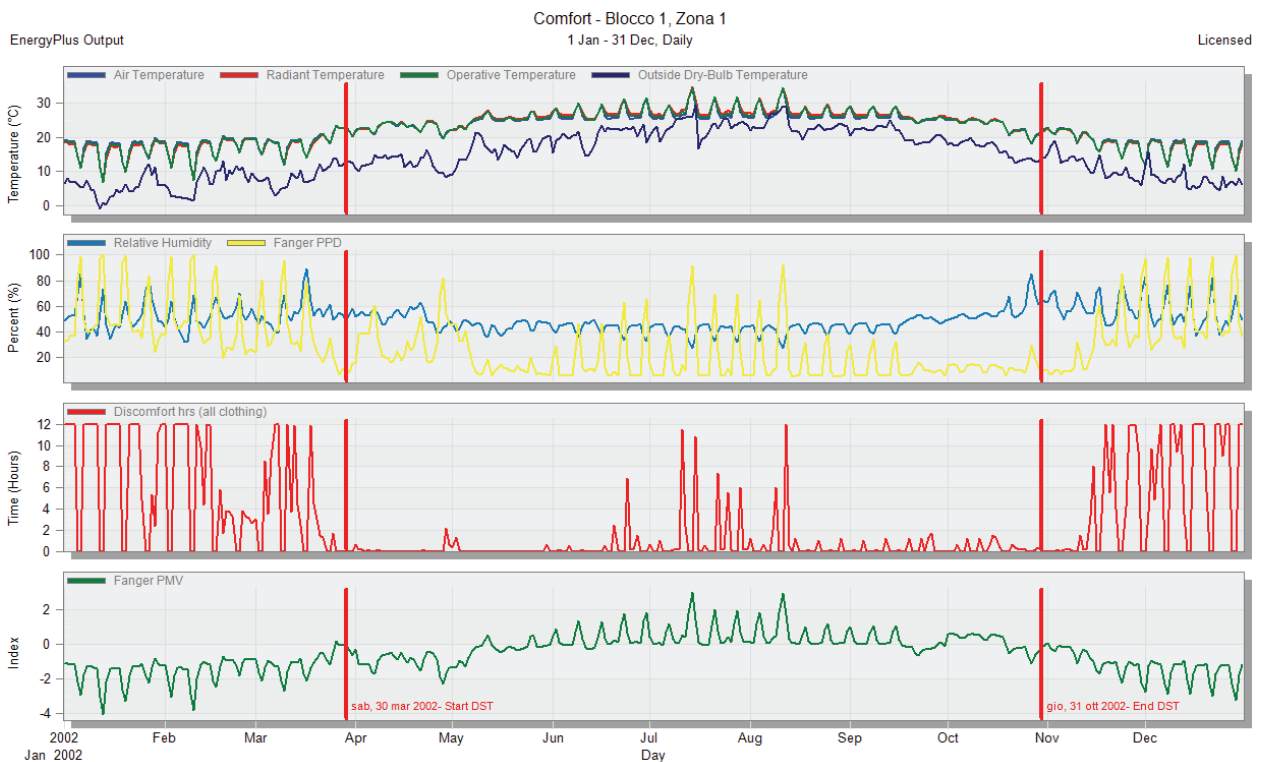


Figura 34

10.2.3. Set-point 21°C – 25°C

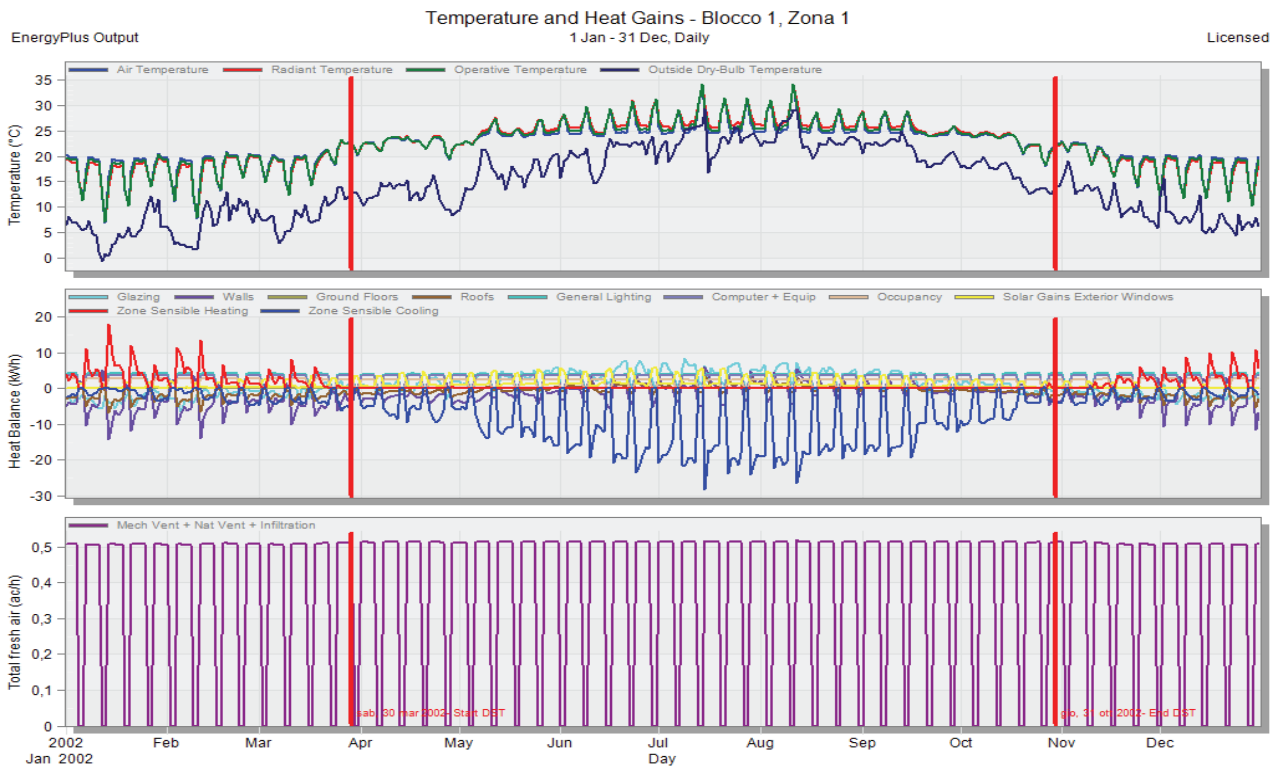


Figura 35

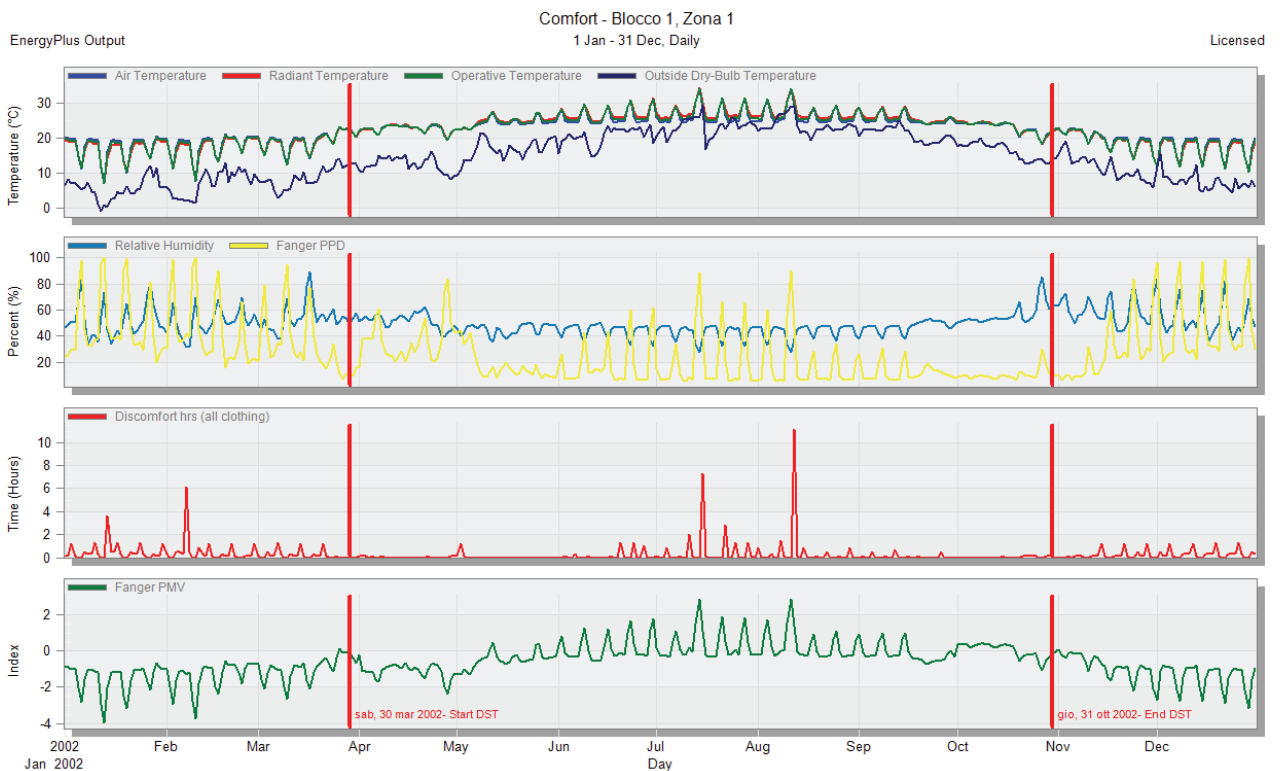


Figura 36

10.2.4. Set-point 22°C – 24°C

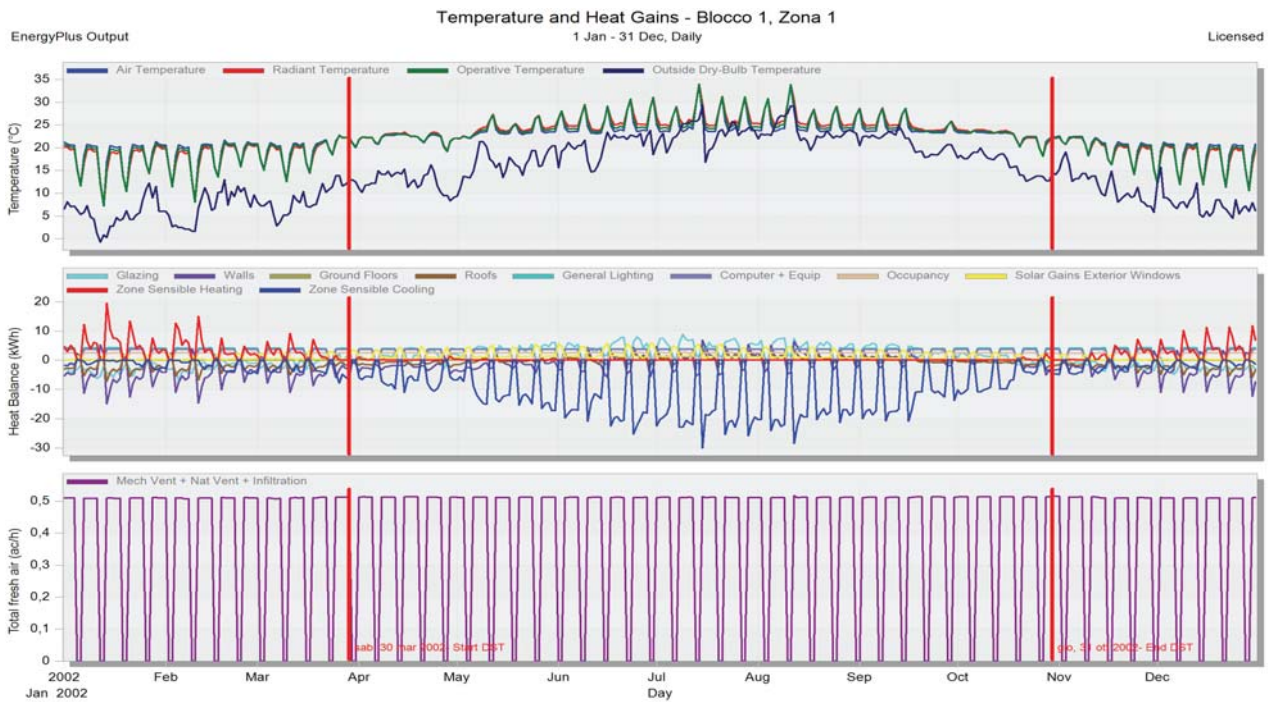


Figura 37

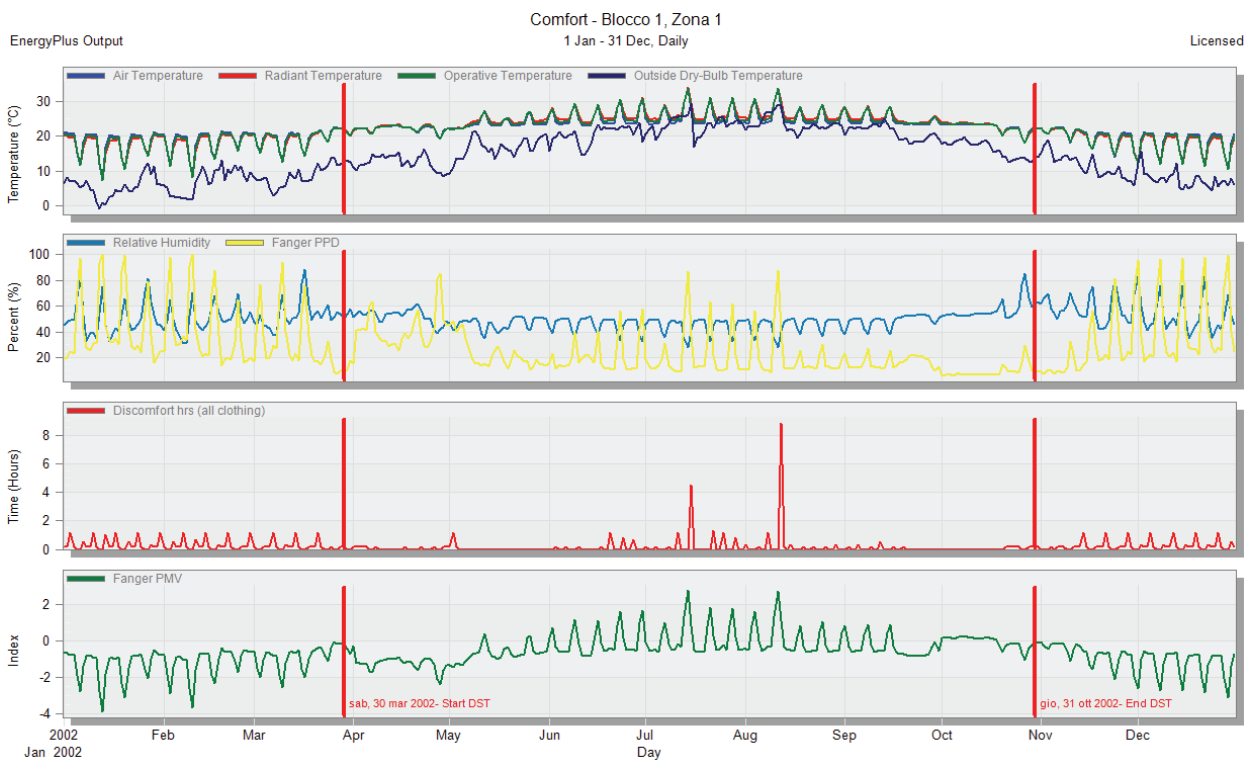


Figura 38

Tabella riassuntiva - Occupazione standard					
set-point [°C]	HEATING [kWh]	COOLING [kWh]	ILLUMINAZIONE [kWh]	ATTREZZATURA [kWh]	DISCOMFORT [h]
20 - 26	410,33	2083,08	1056,78	977,79	770,33
21 - 25	510,49	2309,99	1056,78	977,79	482,83
22 - 24	625,3	2556,59	1056,78	977,79	258,83

Tabella riassuntiva - Occupazione standard					
set-point [°C]	HEATING [kWh]	COOLING [kWh]	ILLUMINAZIONE [kWh]	ATTREZZATURA [kWh]	VARIAZIONE [%]
20 - 26	410,33	2083,08	1056,78	977,79	-
21 - 25	510,49	2309,99	1056,78	977,79	7%
22 - 24	625,3	2556,59	1056,78	977,79	15%

set-point [°C]	DISCOMFORT [h]	VARIAZIONE [%]
20 - 26	770,33	-
21 - 25	482,83	-37%
22 - 24	258,83	-66%

Tabella 23

10.2.5. Occupazione dinamica

Come in precedenza i seguenti modelli sono basati su un'occupazione di tipo dinamica.

10.2.6. Set-point 20°C – 26°C

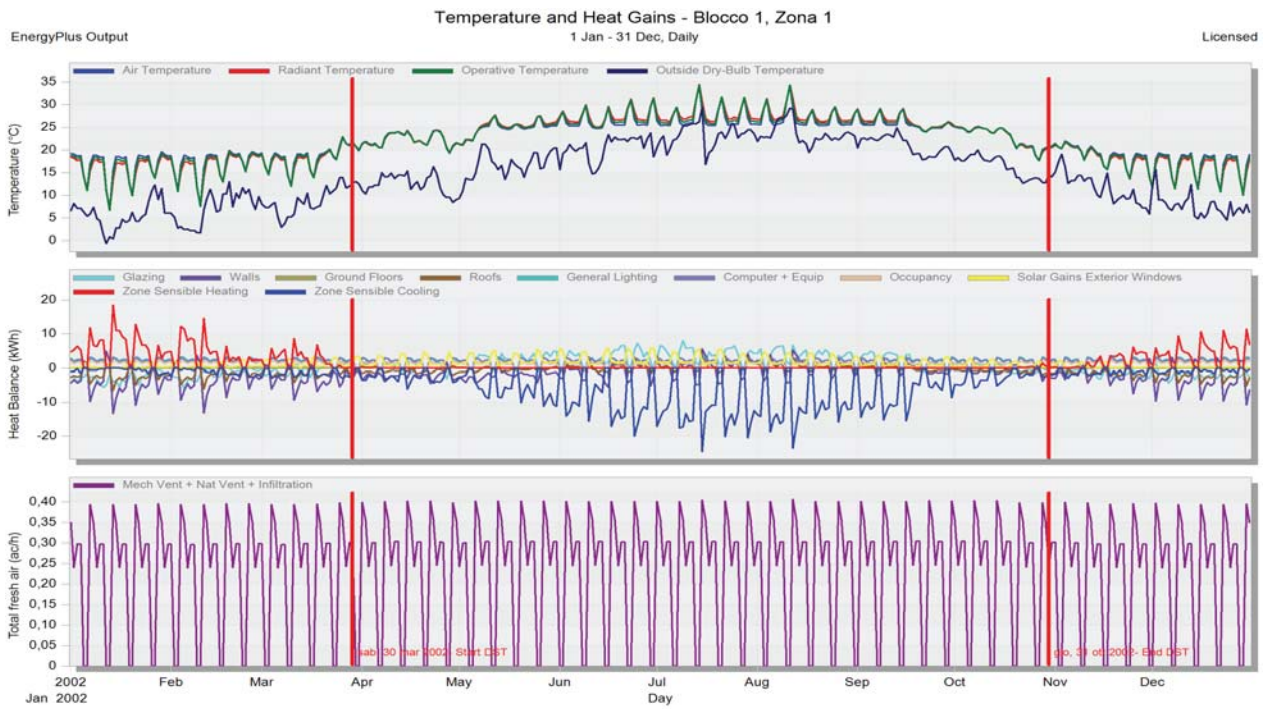


Figura 39

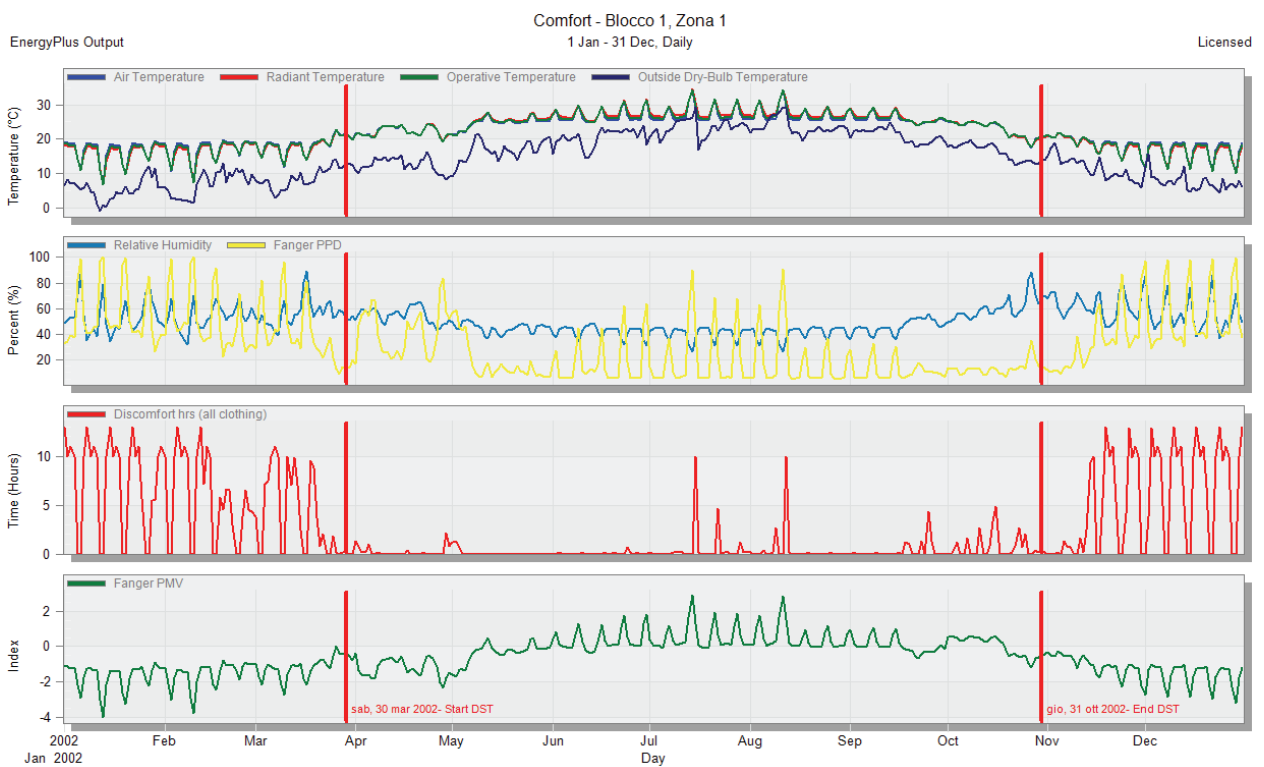


Figura 40

10.2.7. Set-point 21°C – 25°C

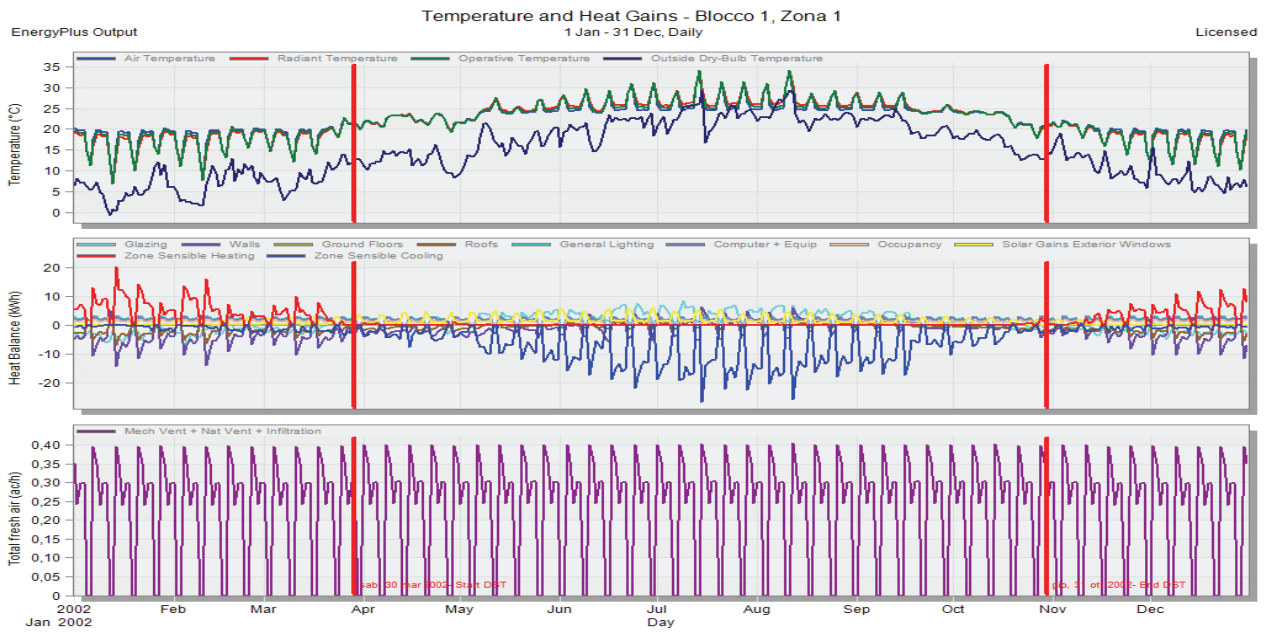


Figura 41

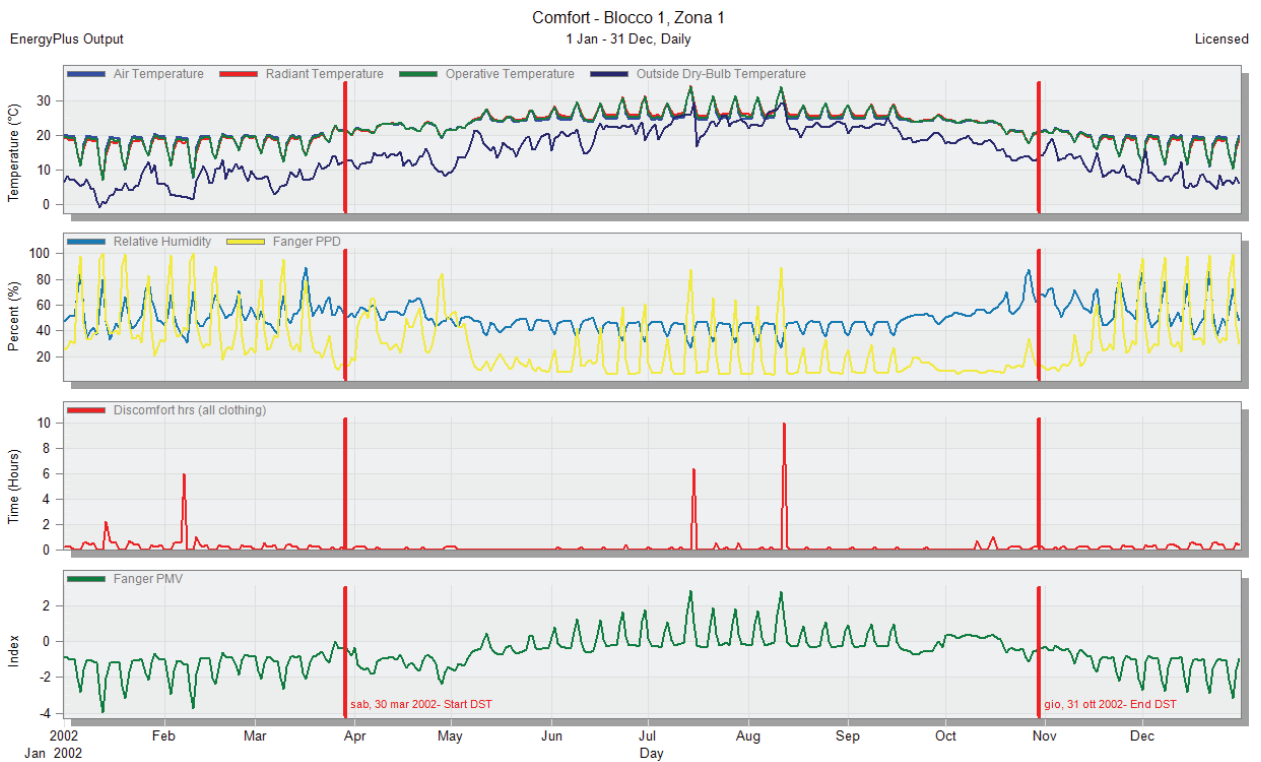


Figura 42

10.2.8. Set-point 22°C – 24°C



Figura 43

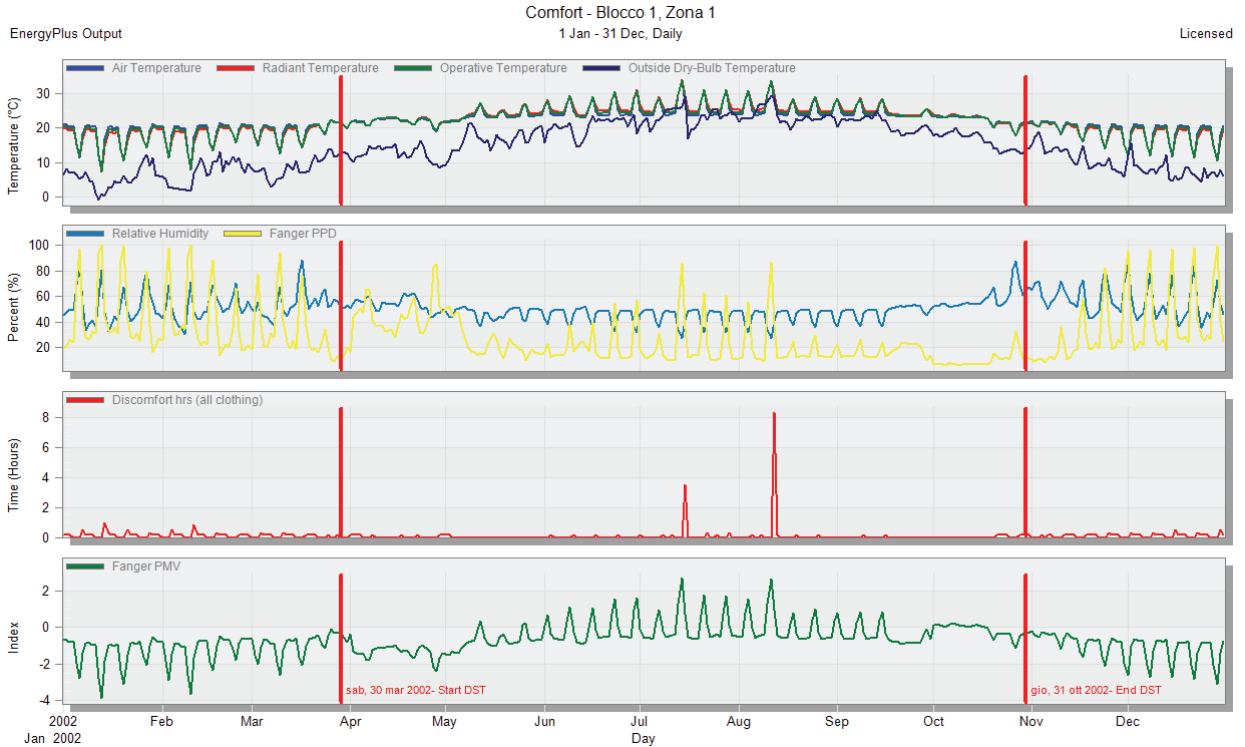


Figura 44

Tabella riassuntiva - Occupazione reale					
set-point [°C]	HEATING [kWh]	COOLING [kWh]	ILLUMINAZIONE [kWh]	ATTREZZATURA [kWh]	DISCOMFORT [h]
20 - 26	628,55	1534,62	651,14	610,55	619,83
21 - 25	751,72	1718,44	651,14	610,55	367,17
22 - 24	895,22	1916,62	651,14	610,55	216,83

Tabella riassuntiva - Occupazione reale					
set-point [°C]	HEATING [kWh]	COOLING [kWh]	ILLUMINAZIONE [kWh]	ATTREZZATURA [kWh]	VARIAZIONE [%]
20 - 26	628,55	1534,62	651,14	610,55	-
21 - 25	751,72	1718,44	651,14	610,55	9%
22 - 24	895,22	1916,62	651,14	610,55	19%

set-point [°C]	DISCOMFORT [h]	VARIAZIONE [%]
20 - 26	619,83	-
21 - 25	367,17	-41%
22 - 24	216,83	-65%

Tabella 24

10.2.9. Confronto – edificio fortemente isolato

ORE DI DISCOMFORT TERMICO			
set-point [°C]	OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	variazione [%]
20 - 26	770,33	619,83	-19,54%
21 - 25	482,83	367,17	-23,95%
22 - 24	258,83	216,83	-16,23%

Tabella 25

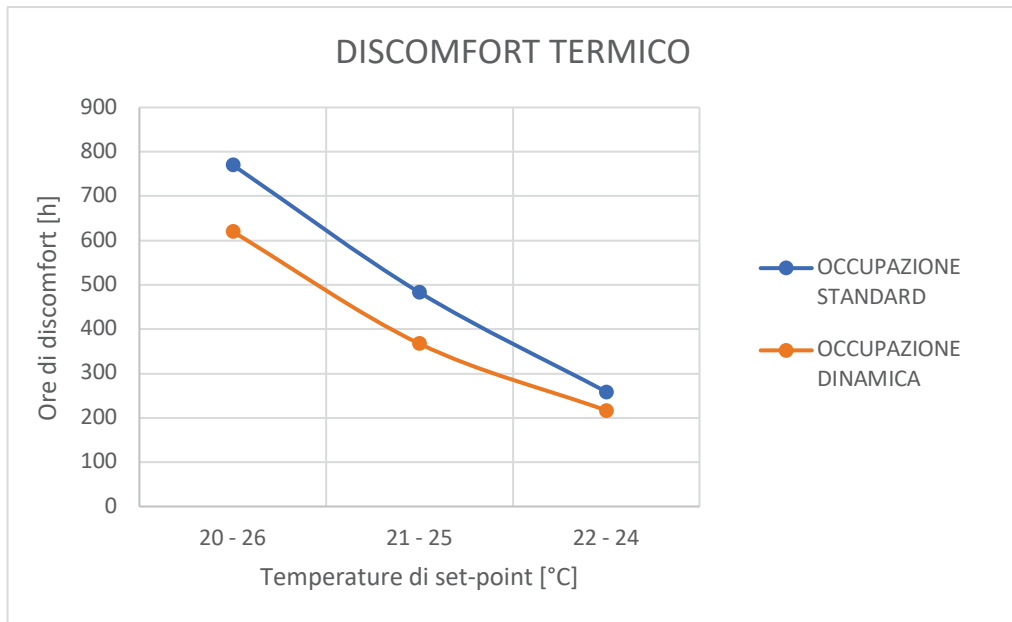


Figura 45

HEATING [kWh]			
set-point [°C]	OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
20	410,33	628,55	53,18%
21	510,49	751,72	47,25%
22	625,3	895,22	43,17%

Tabella 26

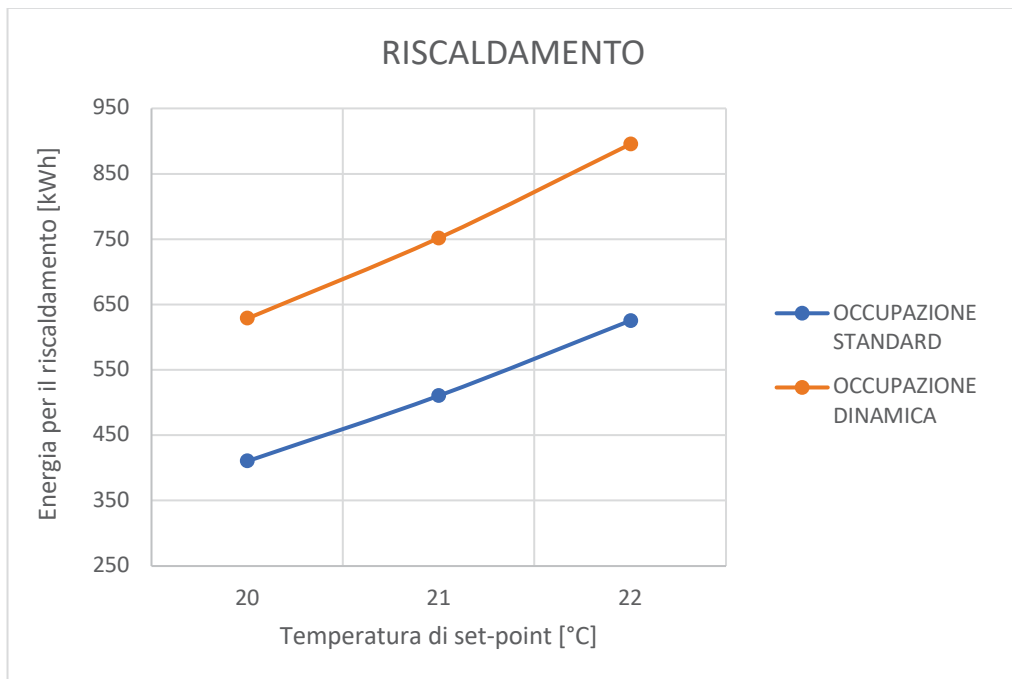


Figura 46

COOLING [kWh]			
set-point [°C]	OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
26	2083,08	1534,62	-26,33%
25	2309,99	1718,44	-25,61%
24	2556,59	1916,62	-25,03%

Tabella 27

ENERGIA ELETTRICA ILLUMINAZIONE [kWh]		
OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
1056,78	651,14	-38,38%

Tabella 28

ENERGIA ELETTRICA ATTREZZATURA [kWh]		
OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
977,79	610,55	-37,56%

Tabella 29

TOTAL ENERGY [kWh]			
set-point [°C]	OCCUPAZIONE STANDARD	OCCUPAZIONE REALE	
20 - 26	4527,98	3424,86	-24,36%
21 - 25	4855,05	3731,85	-23,13%
22 - 24	5216,46	4073,53	-21,91%

Tabella 30

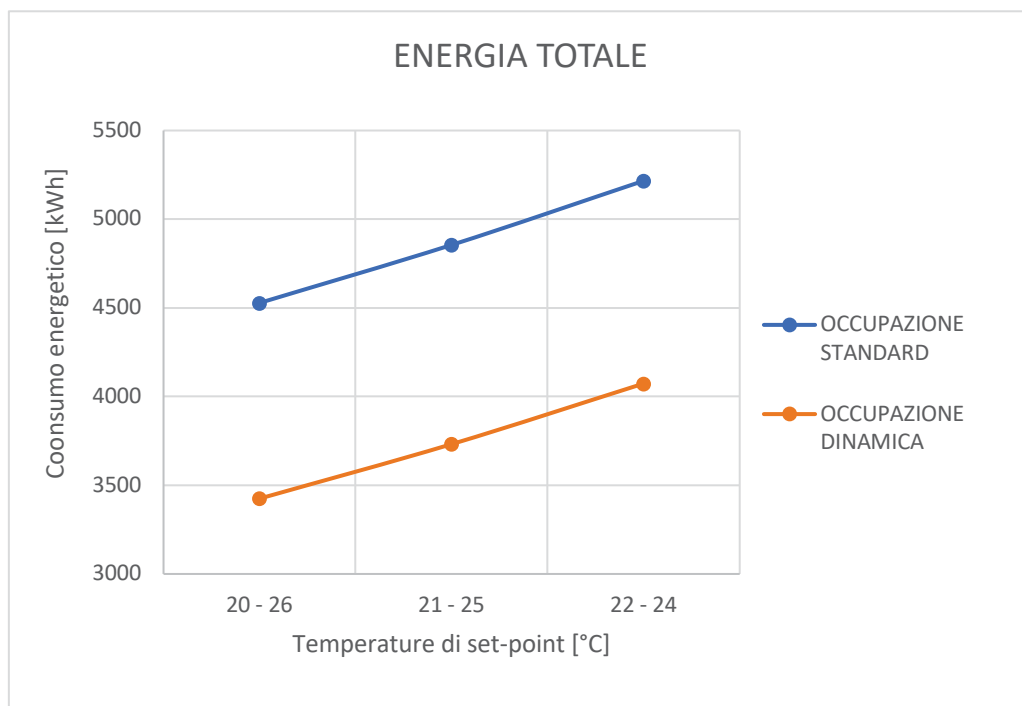


Figura 47

Le considerazioni effettuate per i modelli simulativi basati sull'edificio standard sono ripetibili per i modelli realizzati sull'edificio fortemente isolato.

Confrontando tra loro i risultati delle due tipologie di edificio, è visibile come la riduzione del consumo energetico in funzione dei profili occupazionali risulti maggiore nell'edificio standard, in quanto più disperdente.

Risulta interessante il confronto delle ore di discomfort termico; la diminuzione del discomfort termico, in funzione dell'incremento della temperatura di set-point per il riscaldamento e della diminuzione di quella di raffrescamento, risulta maggiore per l'edificio fortemente isolato rispetto all'edificio standard. Questo si verifica anche perché a parità di set-point, si ottiene un maggior comfort nell'edificio standard rispetto a quello fortemente isolato. Questo fenomeno può essere causato o dall'eccessiva coibentazione delle pareti e della copertura, che portano ad un incremento rapido della temperatura dell'aria, non controllabile in modo immediato dal sistema HVAC o a possibili fenomeni di asimmetria radiante.

11. Conclusioni

L'obiettivo della presente tesi è stato quello di definire la fattibilità di utilizzare determinati parametri, in questo caso parametri biometrici degli occupanti e profili occupazionali, al fine di realizzare un sistema di gestione dinamica del sistema HVAC.

Nella prima parte sono stati presi in riferimento i parametri biometrici di temperatura superficiale della pelle e battito cardiaco. In particolare, sono stati ottenuti un totale di 138 dati di T_{skin} e HR mediati in un intervallo di 5 minuti, associati ad altrettante valutazioni della sensazione termica personale.

Dai risultati si è desunta l'impossibilità di considerare i parametri suddetti per la gestione del sistema HVAC, in quanto non si è riuscito ad individuare una vera e propria correlazione diretta tra i termini valutati e la sensazione termica degli occupanti.

Nella seconda parte della tesi invece si è considerato come parametro il profilo occupazionale degli ambienti. Si è cercato di valutare i benefici che una gestione dinamica del sistema HVAC potrebbe portare al consumo energetico dell'edificio e al miglioramento delle condizioni di benessere degli occupanti.

A tal fine, si sono realizzati 12 modelli di simulazione dinamica in cui sono stati fatti variare i fattori di isolamento termico degli edifici, le temperature di set-point e i profili occupazionali.

I risultati hanno mostrato una notevole diminuzione dei consumi energetici e un notevole incremento del comfort ambientale. Si è registrata una diminuzione del consumo energetico di circa il 14% nell'edificio standard e circa il 22% nell'edificio fortemente isolato, con una diminuzione delle ore di discomfort di circa il 20%.

Questi dati validano la possibilità di considerare un profilo occupazionale reale per effettuare una gestione dinamica del sistema HVAC. Naturalmente per realizzare quanto detto sarebbe necessario effettuare prima un periodo di osservazione, della durata di una annualità, in modo da ottenere un profilo occupazionale coerente con l'edificio analizzato.

Un ulteriore spunto di riflessione può essere dedotto dai dati dei consumi energetici dei singoli sistemi di riscaldamento e raffrescamento. Si nota come i consumi energetici dei due sistemi siano rispettivamente sottostimati e sovrastimati considerando un profilo occupazionale standard rispetto ad uno dinamico. Di conseguenza, essendo utilizzati nelle pratiche comuni di progettazione dei metodi di calcolo standard, può verificarsi comunemente una sottostima della potenza degli impianti di riscaldamento e una sovrastima di quelli di climatizzazione.

Bibliografia

- [1] “Optimizing Energy Consumption and Occupants Comfort in Open-plan Offices Using Local Control based on Occupancy Dynamic Data”.
- [2] Wei Li, Jili Zhang *, Tianyi Zhao, Ruobing Liang “Experimental research of online monitoring and evaluation method of human thermal sensation in different active states based on wristband device”.
- [3] D. Wang, H. Zhang, E. Arens, et al., Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort, *Build. Environ.* 42 (12) (2007) 3933–3943. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.035>.
- [4] K. Nakayama, T. Suzuki, K.I. Kameyama, et al., Estimation of thermal sensation using human peripheral skin temperature, *International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 13, IEEE, Atlanta, 2009, pp. 2872–2877 <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2013.6727640>
- [5] C. Sugimoto, Human sensing using wearable wireless sensors for smart environments, in: *International Conference on Sensing Technology*, IEEE, 2013, pp. 188–192, doi: 10.1109/ICSENS.2013.6727640.

- [6] S.Y. Sim, M.J. Koh, K.M. Joo, et al., Estimation of thermal sensation based on wrist skin temperatures, *Sensors* 16 (4) (2016), doi: 10.3390/s16040420.
- [7] S.Y. Sim, M.J. Koh, K.M. Joo, et al., Estimation of thermal sensation based on wrist skin temperatures, *Sensors* 16 (4) (2016), doi: 10.3390/s16040420.
- [8] T.A. Reddy , *Applied Data Analysis and Modeling for Energy Engineers and Sci- entists*, Springer US, 2011.
- [9] ASHRAE Standing Standard Project Committee 55 Cognizant TC: TC 2.1, *Physiology and Human Environment SPS Liaison*: Kenneth W. Cooper.

Storiografia

1. <https://www.mygreenbuildings.org/2009/12/29/indici-di-comfort-termico-fanger-pmv-modello-adattivo-e-diagramma-bioclimatico-di-givoni.html>
2. <https://energyplus.net>
3. <http://designbuilderitalia.it>