



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi del thermal comfort per l'edificio residenziale pubblico oggetto di diagnosi energetica nella zona climatica Centro Italia (zona D: $1.400 < GG \leq 2.100$)

D. Testi, E. Schito, D. Della Vista, P. Conti,
P. Signoretti, D. Iatauro

ANALISI DEL THERMAL COMFORT PER L'EDIFICIO RESIDENZIALE PUBBLICO OGGETTO DI DIAGNOSI ENERGETICA
NELLA ZONA CLIMATICA CENTRO ITALIA (ZONA D: $1.400 < GG \leq 2.100$)

Daniele Testi, Eva Schito, Davide Della Vista, Paolo Conti (Università di Pisa)
Paolo Signoretti, Domenico Iatauro (ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici mirata a conseguire il raggiungimento di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo: Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nZEB

Responsabile del Progetto: Ing. Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione Analisi del thermal comfort per l'edificio residenziale pubblico oggetto di diagnosi energetica nella zona climatica Centro Italia (zona D: $1.400 < GG \leq 2.100$)

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Paolo Signoretti

Responsabile scientifico Università di Pisa: Prof. Ing. Daniele Testi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 PREMESSA.....	5
1.2 OBIETTIVI DEL LAVORO.....	5
1.3 CONTESTUALIZZAZIONE DEL BENESSERE TERMOIGROMETRICO NEGLI EDIFICI DELL'ERP.....	5
2 SCELTA DEL CASO STUDIO.....	8
2.1 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO.....	8
3 CAMPAGNA DI MONITORAGGIO.....	10
4 ANALISI DELLO STATO DI FATTO.....	17
4.1 MODELLAZIONE CON TRNSYS E VALIDAZIONE CON DATI DI MONITORAGGIO.....	17
4.2 ANALISI DELLO STATO DI COMFORT SU UN ANNO DI RIFERIMENTO.....	23
5 ANALISI DELLO STATO DI COMFORT DOPO GLI INTERVENTI DI RETROFIT.....	29
6 CONCLUSIONI.....	39
BIBLIOGRAFIA.....	40
BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEI MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO.....	42

Sommario

La presente ricerca descrive le attività svolte per caratterizzare le condizioni di benessere termoigrometrico di un appartamento all'interno di un edificio di edilizia residenziale pubblica della provincia di Pisa, considerato rappresentativo della zona climatica Centro Italia (zona D).

Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

- Analisi della letteratura sui problemi di benessere termoigrometrico all'interno di edifici di edilizia residenziale pubblica;
- Campagna sperimentale per l'acquisizione di dati di temperatura e umidità relativa all'interno dell'appartamento;
- Simulazione dinamica dell'edificio allo stato di fatto, con validazione del modello tramite i dati acquisiti durante la campagna sperimentale, con valutazione degli indici di comfort;
- Simulazione dinamica dell'edificio allo stato riqualificato individuato, per verificare il miglioramento del benessere interno all'appartamento a seguito delle ipotesi di riqualificazione scelte.

1 Introduzione

1.1 Premessa

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2015-2017 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale, approvato con il Decreto Ministeriale del 21 aprile 2016.

La presente relazione tecnica si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2017, per quanto attiene all'Area D "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici", tema di ricerca "D.2 Edifici a energia quasi zero (nZEB)". Il tema sviluppato nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria, dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa riguarda la verifica del miglioramento del comfort termoigrometrico all'interno di edifici di tipo residenziale pubblico, a seguito di interventi di retrofit scelti per migliorarne le prestazioni energetiche.

1.2 Obiettivi del lavoro

Il lavoro effettuato ha, come obiettivo, la verifica del miglioramento degli indici di comfort termoigrometrico a seguito di interventi di retrofit. Come caso di studio si è scelto un appartamento all'interno di un edificio rappresentativo dell'edilizia residenziale pubblica (ERP nel seguito) nel Centro Italia (zona D: $1400 < GG \leq 2100$). Il caso studio considerato è stato già oggetto di studio nel precedente Report di Ricerca "Studio di un edificio di edilizia residenziale pubblica di riferimento nella zona climatica (zona D: $1400 < GG \leq 2100$) [1]. Per il calcolo degli indici di benessere termoigrometrico si è utilizzato il software TRNSYS [2], il cui modello dell'edificio è stato validato a seguito di una campagna sperimentale nell'appartamento, in cui sono stati acquisiti temperatura e umidità relativa interna.

1.3 Contestualizzazione del benessere termoigrometrico negli edifici dell'ERP

Gli edifici ERP nascono come risposta al problema abitativo di una parte della popolazione che non è in grado di acquistare o prendere in affitto un immobile ai prezzi di mercato. Storicamente, con la legge Luzzatti prima (inizio del 1900) e con il piano Fanfani poi (secondo dopoguerra), lo Stato Italiano ha contribuito alla costruzione di alloggi per le famiglie a basso reddito tramite contributi finanziari, sconti sulle imposte erariali o locali, o mettendo a disposizione l'area edificabile sul quale realizzare gli edifici [3].

Dapprima la costruzione di questi edifici risolveva la sola questione abitativa, fornendo un aiuto concreto agli individui e ai nuclei familiari in condizioni di disagio abitativo. Negli ultimi decenni, è stato dato maggiore risalto alle caratteristiche dell'ERP in termini di sostenibilità ambientale ed efficienza energetica [4,5]: in particolare vengono auspicati investimenti nell'efficienza energetica negli edifici dell'edilizia residenziale pubblica come modo di contribuire alla coesione economica, sociale e territoriale dello stato [5].

La necessità di riqualificare il patrimonio ERP deriva anche da un'analisi dello stock di edifici esistenti. Secondo un censimento effettuato da Federcasa [6], il patrimonio di edifici appartenenti a ERP in Italia presenta rilevanti problematiche dovute principalmente all'elevata età media associata a pochi e spesso poco appropriati interventi di manutenzione [7]. Questo comporta efficienze energetiche molto basse per questi edifici: per mantenere adeguate condizioni di comfort in questi alloggi sarebbero quindi necessarie spese elevate. Una valutazione sempre associata al lavoro effettuato da Federcasa ha stimato che le spese per le richieste energetiche sarebbero pari circa al 10% del reddito delle persone residenti negli alloggi [6]: si tratta di una percentuale che spesso gli utenti non sono in grado di sostenere, costringendo quindi a ridurre le richieste energetiche e diminuire quindi le proprie condizioni di comfort [8]. Questo concetto è noto come "povertà energetica" (in inglese, "fuel poverty").

Ovviamente, la povertà energetica e il comfort termico all'interno delle abitazioni sono correlati. Gli studi più dettagliati sugli effetti della povertà energetica sono stati compiuti a partire dal 2000 e prendono in considerazione il riscaldamento invernale: le conseguenze più tipiche sono discomfort termico, brividi e raffreddori, ma possono esserci anche effetti più gravi, tipici soprattutto nelle persone più anziane o debilitate, sia di tipo acuto (problemi cardiovascolari e respiratori) sia di tipo cronico (diminuita resistenza alle infezioni, depressione) [9]. Nel caso più estremo, temperature troppo basse e stress cardiovascolare possono anche portare alla morte: paradossalmente, il numero più elevato di mortalità invernale si trova in Paesi dal clima invernale piuttosto mite, come Italia e Grecia, a causa di un minore isolamento degli alloggi e maggiore povertà energetica [10].

A livello di manifestazioni sull'involucro associate alla povertà energetica, si verificano soprattutto condensa superficiale sulle finestre e condensa e muffe sulle pareti. In un'intervista del 2007 [11], la maggior parte delle persone in condizioni di povertà energetica ha dichiarato di ritenere significativo l'effetto delle pareti fredde e umide sul comfort termico. Queste condizioni sono collegate ad aumento del rischio di asma, tosse e bronchite [12] e sono le problematiche più diffuse negli edifici ERP.

Tra le soluzioni più diffuse per la riqualificazione energetica di questi edifici, volte anche al miglioramento del comfort termico, c'è l'applicazione di cappotti termici, che riducono la probabilità di formazione di condensa e muffa con conseguente miglioramento del comfort [13]. Inoltre, questo tipo di applicazione è ormai standard. In [14] vengono descritte ulteriori misure di efficienza energetica, con l'obiettivo sia di ridurre le

emissioni di CO₂ sia di migliorare il comfort interno. Tra queste, oltre al già citato cappotto termico, sono considerate: isolamento del sottotetto, sostituzione degli infissi, miglioramento della tenuta all'aria.

La presente ricerca si inquadra all'interno di questo contesto: scelto un'unità abitativa considerata "di riferimento" per la zona climatica D, si sono calcolati gli indici di comfort termico nello stato attuale e a valle di una serie di interventi, scelti nella ricerca precedente [1] per portare l'edificio a NZEB. È stata condotta anche una campagna di monitoraggio per validare sperimentalmente i risultati della simulazione dinamica.

2 Scelta del caso studio

2.1 Descrizione del caso studio

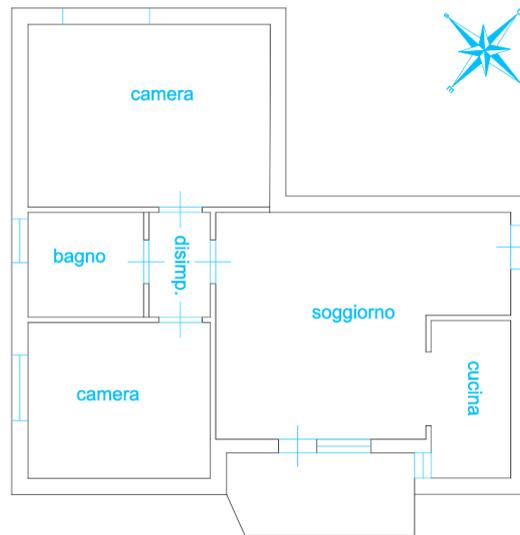
L'appartamento oggetto del caso di studio è stato individuato nel quartiere di Gagno, a Pisa, tra quelli nella gestione APES. È situato nella prima periferia pisana. Per le sue caratteristiche (anno di costruzione, materiali, dimensioni) può essere considerato rappresentativo del patrimonio edilizio dell'ERP della regione Toscana.

L'appartamento appartiene ad un condominio costruito negli anni Sessanta e ha una superficie utile di 52 m²; si compone di un ingresso, un soggiorno, una cucina, due camere e un bagno. L'unità abitativa è esposta a Nord-Est, Sud-Est e Sud-Ovest, mentre le altre pareti perimetrali confinano con il vano scale e con un altro appartamento.

In Figura 1 è riportata la posizione dell'appartamento nel fabbricato ed una pianta dell'appartamento.



(a)



(b)

Figura 1. Posizione dell'appartamento in analisi nel fabbricato (a) e pianta dell'appartamento (b).

Le strutture dell'involucro sono quelle tipiche degli anni Sessanta, con struttura in travi e pilastri e tamponamenti in laterizio a cassetta con intercapedine non ventilata; i solai sono in laterocemento non coibentati. Le finestre sono in singolo vetro con infisso in legno.

Maggiori informazioni sulle caratteristiche dell'appartamento oggetto di analisi si trovano in [1].

3 Campagna di monitoraggio

Per l’analisi del comfort interno all’unità abitativa si è proceduto ad una campagna di monitoraggio di temperatura e umidità relativa interna al locale. Contemporaneamente si è registrato il clima esterno per Pisa da una centralina climatica che si trova a 1.5 km di distanza.

Durante la campagna di monitoraggio si sono utilizzati tre sensori 4-NOKS ZED-THL-M.

Le caratteristiche dei sensori sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche dei sensori utilizzati nella campagna di monitoraggio.

Parametro monitorato	Range di misura	Accuratezza	Timestep di acquisizione
Temperatura	-40...+120 °C	±0.2 K nel range 5...40 °C	6 minuti
Umidità relativa	0...100%	±3% nel range 0...100%	6 minuti

I sensori sono stati posizionati in cucina, soggiorno e in una camera, che è stata occupata a partire dal 3 novembre.

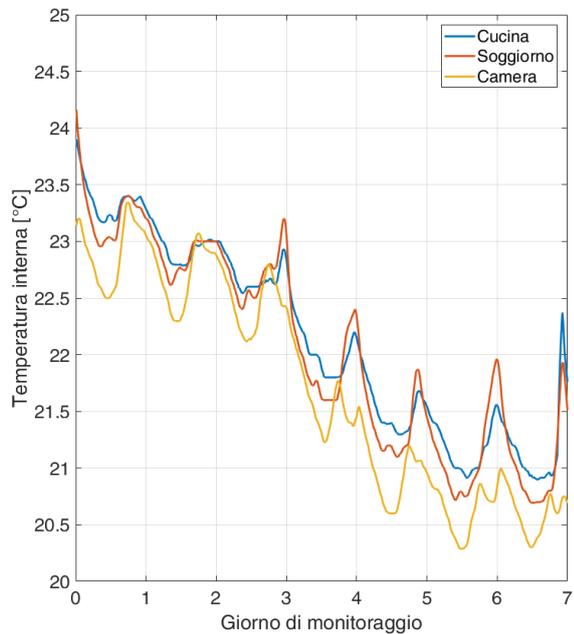
La campagna di monitoraggio si è protratta dal 12 ottobre al 2 dicembre 2018. All’interno di questo periodo, sono state individuate due settimane significative:

- Una settimana rappresentativa del periodo di evoluzione libera, in cui il sistema di riscaldamento non risultava essere stato ancora acceso (19 ottobre-25 ottobre);
- Una settimana rappresentativa del periodo di riscaldamento (18 novembre-24 novembre).

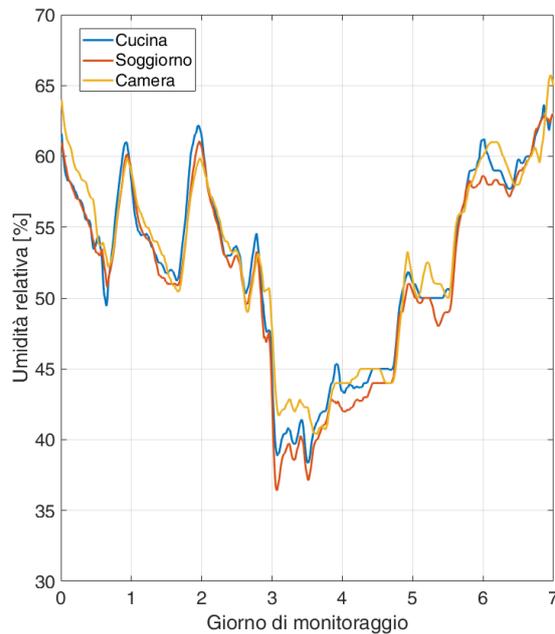
Al termine della campagna di monitoraggio, è stato chiesto agli occupanti dell’appartamento di descrivere i profili di utilizzo dei locali, di modo da poter ricostruire il più fedelmente possibile, nella simulazione dinamica, l’andamento delle temperature e dell’umidità relativa nell’appartamento. Gli usi sono quelli tipici del residenziale:

- Uso cucina a colazione (07:00-07:30) e a cena (20:30-21:30) dal lunedì al sabato, assenza totale dall’appartamento la domenica fino a fine ottobre; a partire da novembre, assenza dall’appartamento anche sabato;
- Utilizzo di PC/TV nelle ore di presenza nell’appartamento;
- Utilizzo di luce artificiale nelle ore serali di presenza nell’appartamento;
- Utilizzo di chiusure oscuranti per tutta la durata del giorno, tranne che per due mezz’ore contestualmente alla colazione e alla cena, in corrispondenza cui avviene anche il ricambio d’aria dei locali;
- Riscaldamento acceso dalle 18 alle 7 con setpoint 21 da lunedì a venerdì; spento di giorno e nel weekend.

Nelle Figure 2 e 3 si riportano gli andamenti di temperatura e umidità relativa delle due settimane di riferimento.



(a)



(b)

Figura 2. Andamento della temperatura (a) e dell'umidità relativa (b) nella prima settimana di monitoraggio, con l'appartamento in evoluzione libera.

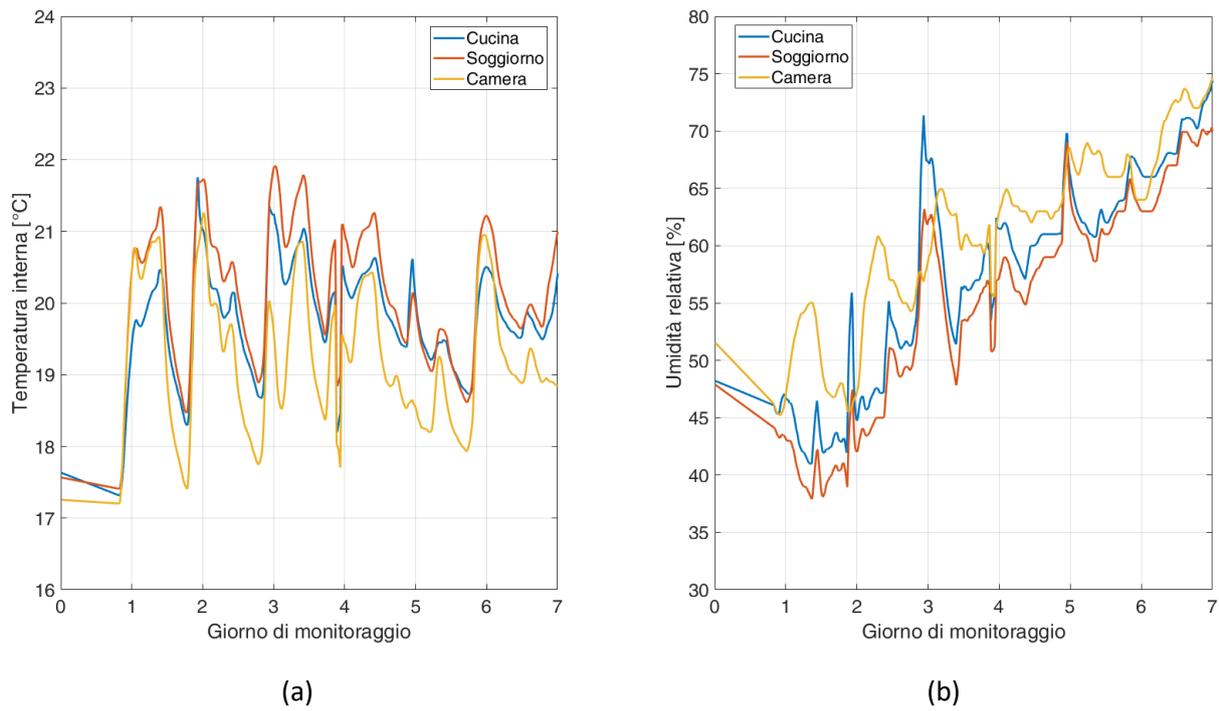


Figura 3. Andamento della temperatura (a) e dell’umidità relativa (b) nella seconda settimana di monitoraggio, con l’appartamento riscaldato.

Una prima analisi dei dati di comfort è stata effettuata utilizzando i dati provenienti dal monitoraggio. Per la settimana di evoluzione libera, i parametri di riferimento per il comfort sono quelli definiti dalla metodologia “adaptive comfort”, definita nella norma tecnica EN 15251 [15]. I dati di monitoraggio sui tre sensori sono stati mediati e sono stati riportati sul grafico in Figura 4, che riporta la temperatura interna in corrispondenza della temperatura esterna. Si noti che, in assenza di dati sulla temperatura media radiante (non era presente un globotermostato per la misura di tale grandezza), in questo caso si è utilizzato direttamente la temperatura dell’aria per la misura del comfort, e non la temperatura operativa.

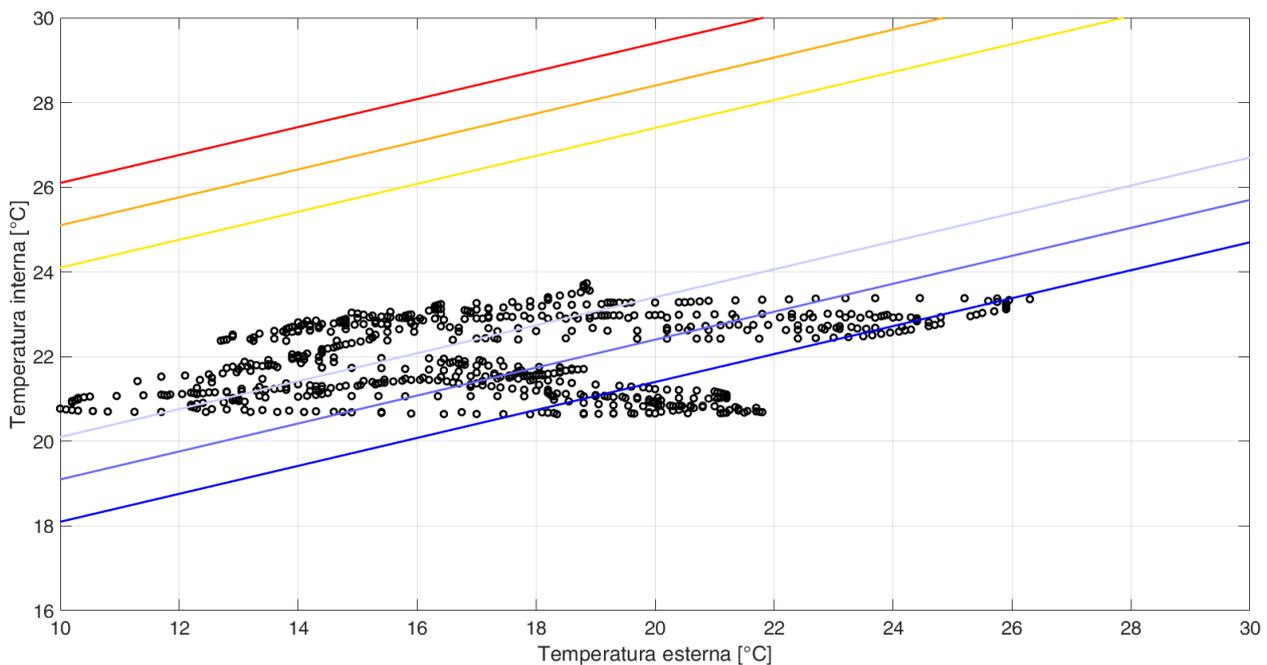


Figura 4. Comfort adattivo nella prima settimana di monitoraggio.

La figura mostra che, sebbene la maggior parte dei punti monitorati rientri nella fascia di comfort, esiste una percentuale di punti che rientra nella fascia “fredda”, cioè la temperatura interna all’appartamento risulta essere più fredda di quella che sarebbe definita confortevole nelle stesse condizioni di temperatura esterna. Secondo quanto riportato nella EN 15251, è possibile dividere l’area del grafico in 4 aree, corrispondenti ognuna ad una categoria di comfort e delimitato dalle corrispettive linee superiori ed inferiori:

- Categoria 1: delimitato dalle rette azzurra (equazione: $T_i = 0.33T_{ext} + 18.8 - 2$) e gialla (equazione: $T_i = 0.33T_{ext} + 18.8 + 2$)
- Categoria 2: delimitato dalle rette viola (equazione: $T_i = 0.33T_{ext} + 18.8 - 3$) e arancione (equazione: $T_i = 0.33T_{ext} + 18.8 + 3$)
- Categoria 3: delimitato dalle rette blu (equazione: $T_i = 0.33T_{ext} + 18.8 - 4$) e rossa (equazione: $T_i = 0.33T_{ext} + 18.8 + 4$)
- Categoria 4: oltre le rette rossa e blu.

In base ai dati monitorati, i risultati trovati sono sintetizzati in Tabella 2.

Tabella 2. Indici di comfort adattivo secondo la EN 15251 [15] per la prima settimana di monitoraggio.

Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
40.4%	22.7%	19.6%	17.2%

Per quanto riguarda invece il comfort nella settimana con riscaldamento, non è stato possibile in questa prima fase utilizzare il tradizionale metodo di Fanger, con il calcolo della percentuale prevista di insoddisfatti e voto medio previsto. Si è utilizzato, in prima approssimazione, il Thermal Comfort Tool dell'ASHRAE (dal sito web: <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>) dal quale sono stati ricavati i limiti tipici di comfort di temperatura dell'aria e di umidità relativa in condizioni invernali, ipotizzando una temperatura media radiante di circa 20 °C (Figura 5). I dati limite di temperatura e umidità relativa sono stati poi considerati per la verifica del comfort nel caso monitorato (Figura 6).

CBE Thermal Comfort Tool

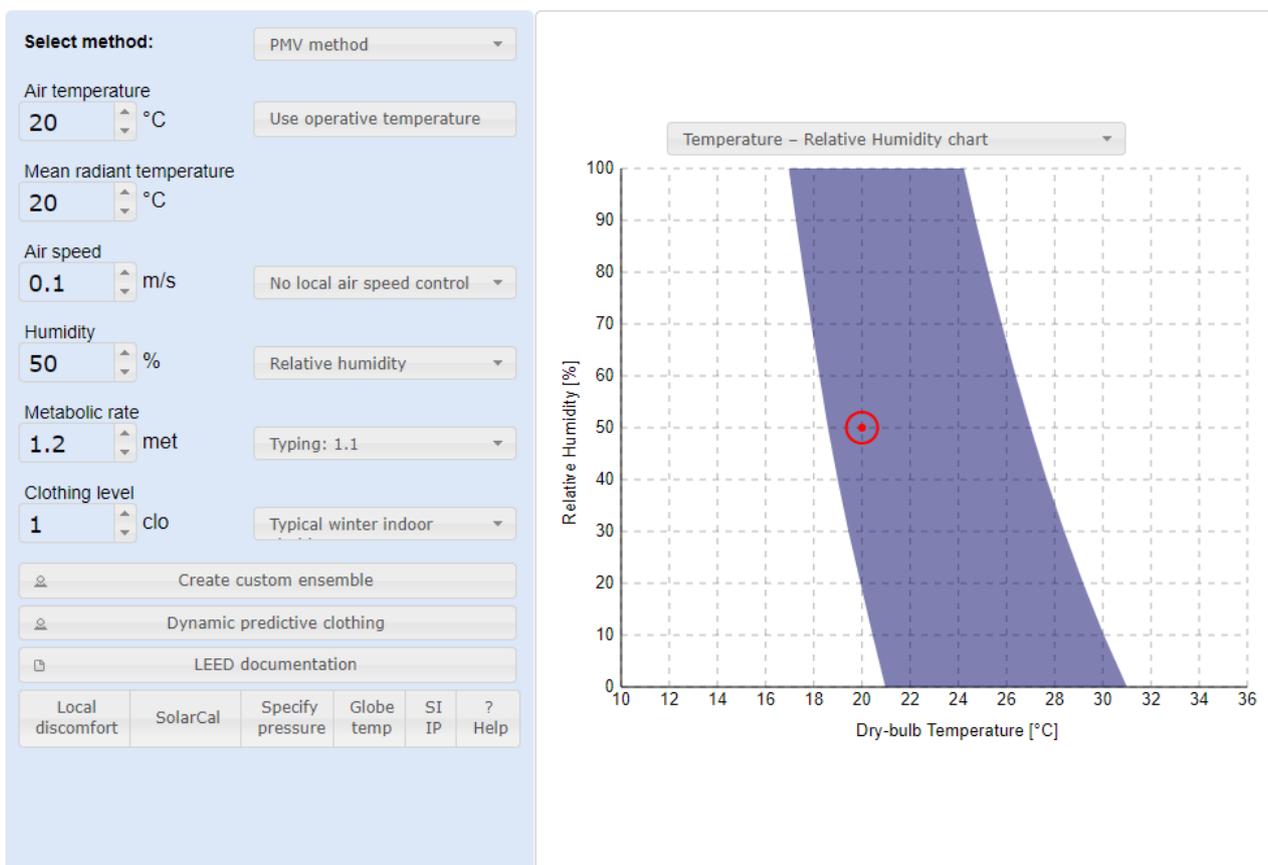


Figura 5. Thermal Comfort Tool di ASHRAE.

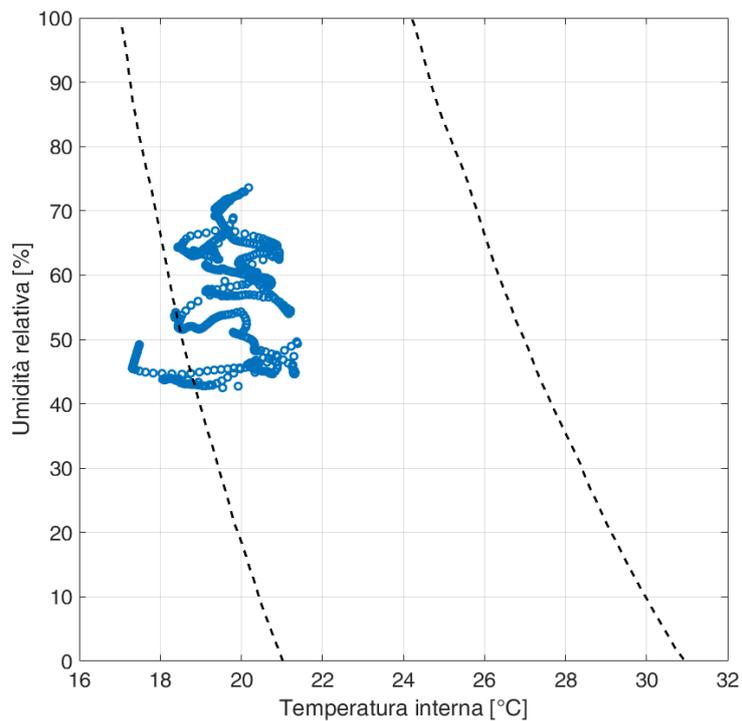


Figura 6. Analisi dei dati di monitoraggio nella seconda settimana, utilizzando i dati limite forniti dal Thermal Comfort Tool di ASHRAE.

Da questa prima analisi, quindi, è risultato che la settimana di riscaldamento risulta essere mediamente confortevole per gli occupanti, anche se in alcuni momenti la temperatura risulta essere troppo bassa rispetto a quella di comfort. Questo potrebbe essere dovuto alla scelta del profilo di riscaldamento, che prevede il completo spegnimento dell'impianto durante le ore diurne. Dall'analisi della distribuzione delle ore al di fuori dal range di comfort, infatti, si nota che queste sono concentrate soprattutto delle ore pomeridiane, a ridosso dell'orario di accensione: si veda la Figura 7.

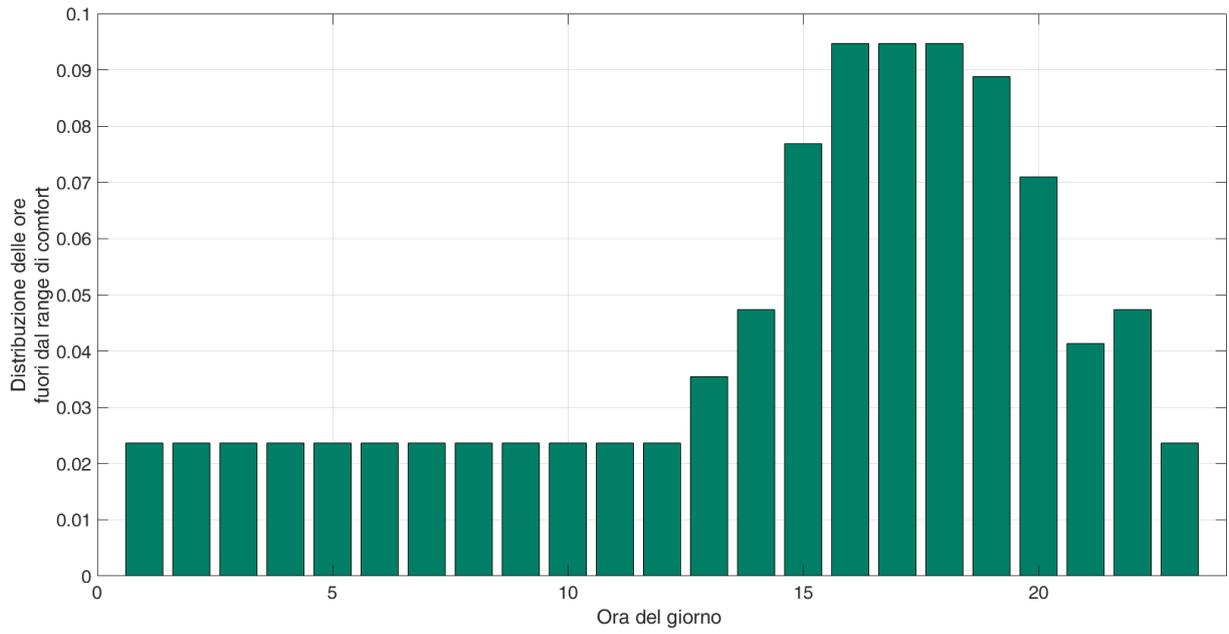


Figura 7. Distribuzione delle ore al di fuori del range di comfort.

4 Analisi dello stato di fatto

4.1 Modellazione con TRNSYS e validazione con dati di monitoraggio

Per verificare il comfort interno su un anno di riferimento, è stato necessario utilizzare una simulazione dinamica. L'appartamento analizzato è stato quindi modellato in TRNSYS, riportando sul modulo TRNBuild le caratteristiche dell'involucro e i profili di utilizzo degli occupanti, mentre su Simulation Studio sono stati riportati i dati climatici esterni rilevati dalla centralina climatica. Il modello utilizzato per la simulazione dell'appartamento in TRNSYS si presenta come in Figura 8.

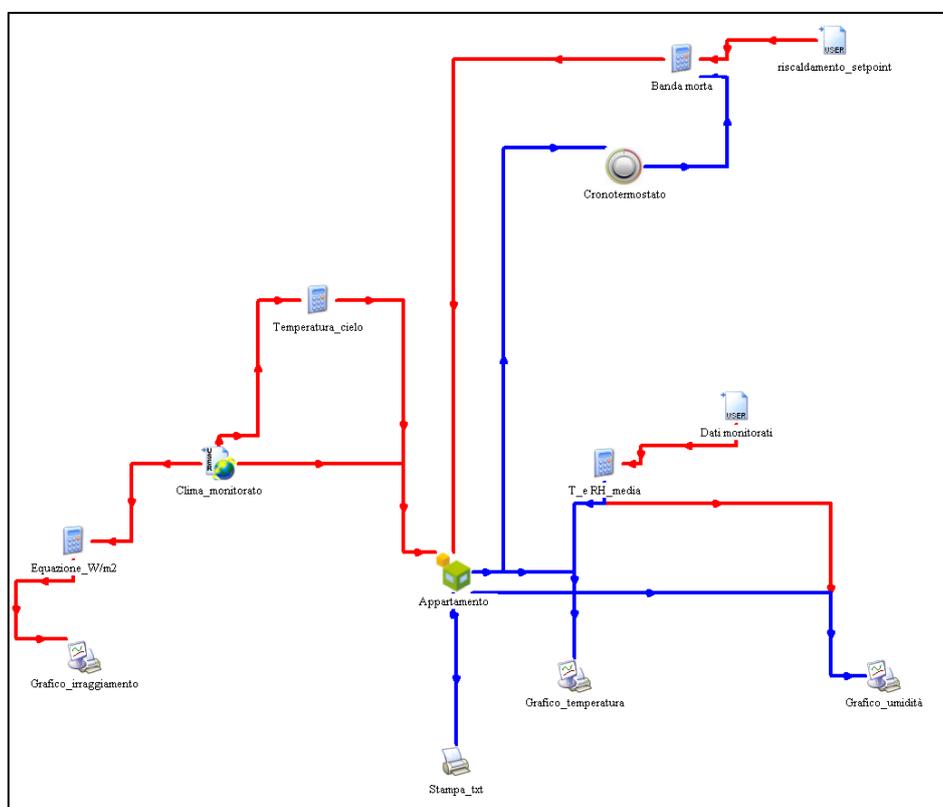
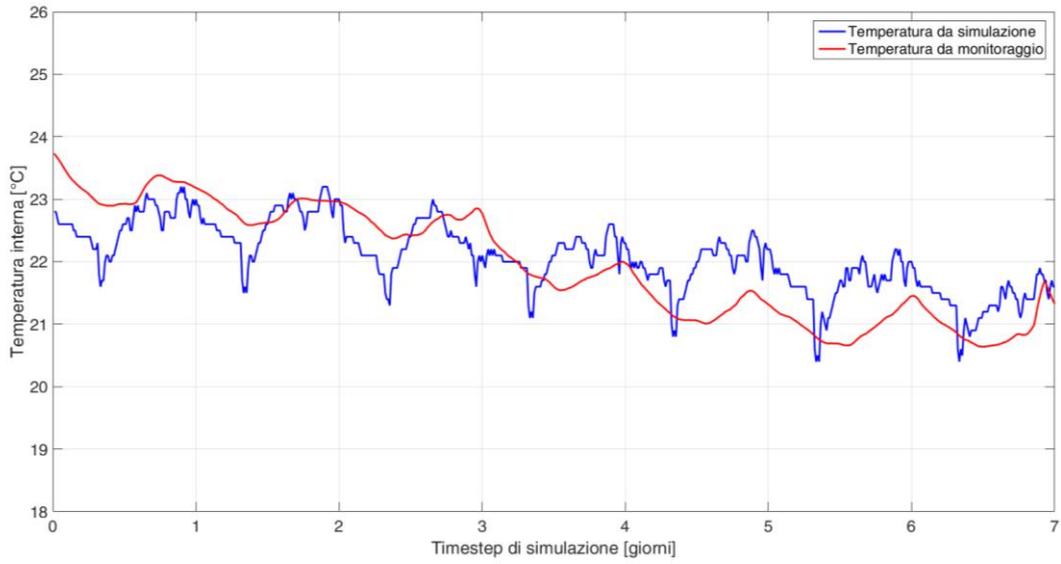
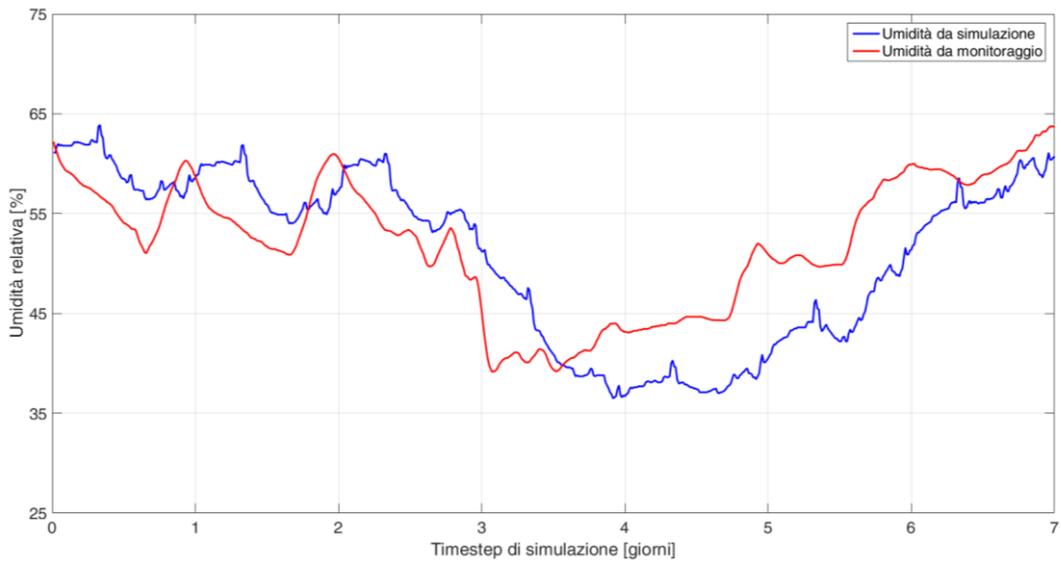


Figura 8. Modello dell'appartamento in TRNSYS.

Sono stati confrontati i risultati della simulazione con quelli provenienti dal monitoraggio per le due settimane di riferimento. Il confronto tra dati monitorati e risultati di simulazione per la prima settimana è riportato in Figura 9, mentre per la seconda settimana in Figura 10.

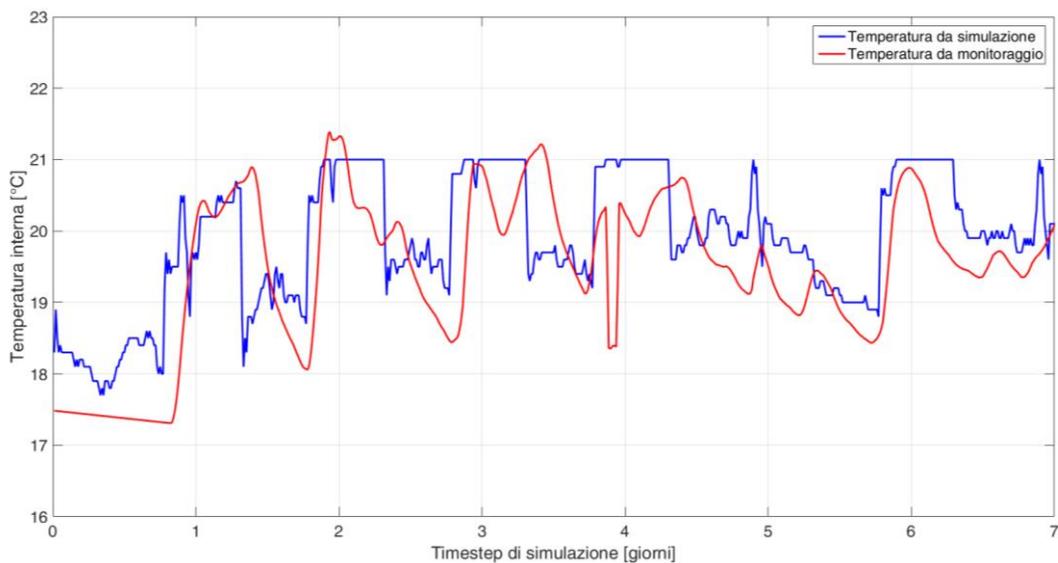


(a)

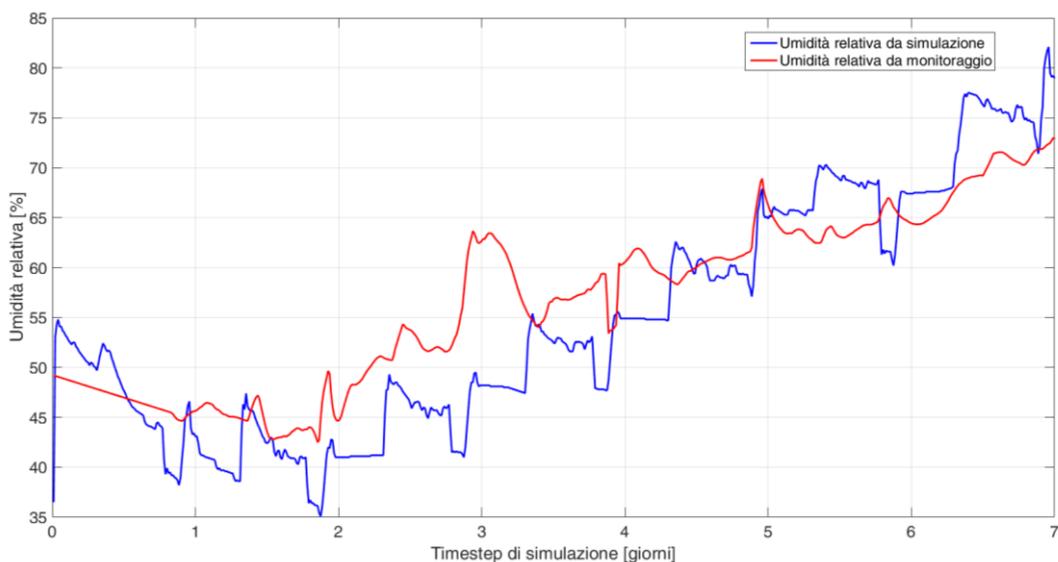


(b)

Figura 9. Confronto tra temperatura simulata e monitorata (a) e umidità relativa simulata e monitorata (b) per la prima settimana di riferimento.



(a)



(b)

Figura 10. Confronto tra temperatura simulata e monitorata (a) e umidità relativa simulata e monitorata (b) per la seconda settimana di riferimento.

I trend di temperatura sono in generale ben rappresentati dalla simulazione in TRNSYS, mentre risulta più difficile individuare gli andamenti dell'umidità relativa, a causa della difficile stima dei carichi latenti.

Sono stati utilizzati dei tradizionali indici di correlazione per verificare la bontà del modello nello stimare correttamente i profili di temperatura e umidità relativa. Questi indici, riportati in Tabella 3, sono i seguenti:

- Indice di correlazione per ranghi di Spearman;
- Percentuale di punti di monitoraggio compresi all'interno di una banda di errore del 10%, $P_{\%10}$;
- Percentuale di punti di monitoraggio compresi all'interno di una banda di errore del 20%, $P_{\%20}$;
- Massimo errore assoluto;

- Massimo errore relativo.

Tabella 3. Indici di correlazione tra dati sperimentali e di monitoraggio di temperatura e umidità relativa per le due settimane di riferimento.

	Temperatura		Umidità relativa	
	Prima settimana	Seconda settimana	Prima settimana	Seconda settimana
Spearman	0.8	0.7	0.7	0.9
P_{%10}	1	0.96	0.56	0.68
P_{%20}	1	1	0.95	0.94
Max errore assoluto	1.2	4.1	13.0	16.7
Max errore relativo	0.06	0.25	0.27	0.27

Per quanto riguarda la temperatura, tutti gli indici di correlazione danno buoni risultati. In particolare, si vede che la quasi totalità dei punti di temperatura da monitoraggio e da simulazione si trova in una fascia di errore minore del 10%, come denota l'indice P_{%10}. Gli indicatori per l'umidità relativa sono invece minori: come detto precedentemente, non è risultato facile la stima dei carichi latenti. Inoltre, il modello di TRNSYS [2,16,17] per l'assorbimento e desorbimento dell'umidità da parte delle pareti (che utilizza un parametro chiamato fattore capacitivo effettivo all'umidità) influenza fortemente l'andamento dell'umidità relativa dell'aria e non erano a disposizione dati sufficienti per l'utilizzo di metodi più specifici. È stato quindi usato un valore di fattore capacitivo all'umidità da tuning dei profili dell'umidità relativa. Si vuole comunque sottolineare che, per questi valori di umidità relativa (clima interno né troppo secco né troppo umido), il comfort degli utenti non risulta influenzato significativamente da questo parametro [18].

Come ulteriore verifica, sono stati confrontati i profili medi giornalieri di temperatura e umidità relativa nelle due settimane di riferimento. Si vedano le Figure 11-12-13-14.

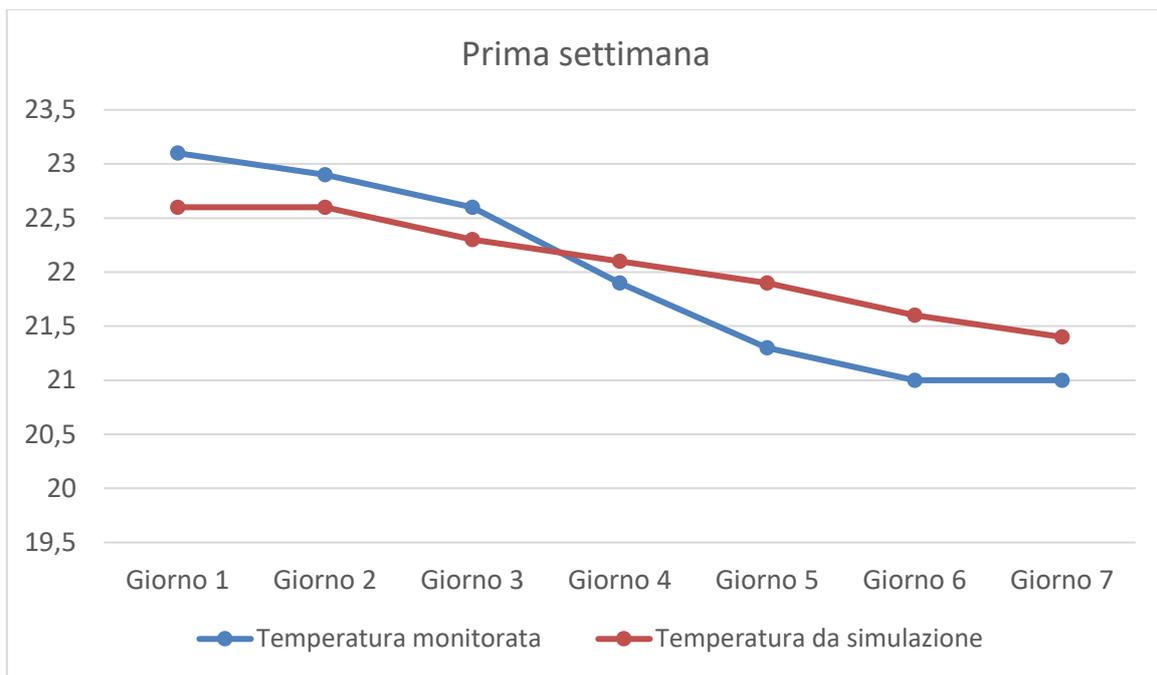


Figura 11. Confronto tra la temperatura media giornaliera da monitoraggio e da simulazione per la prima settimana di riferimento.

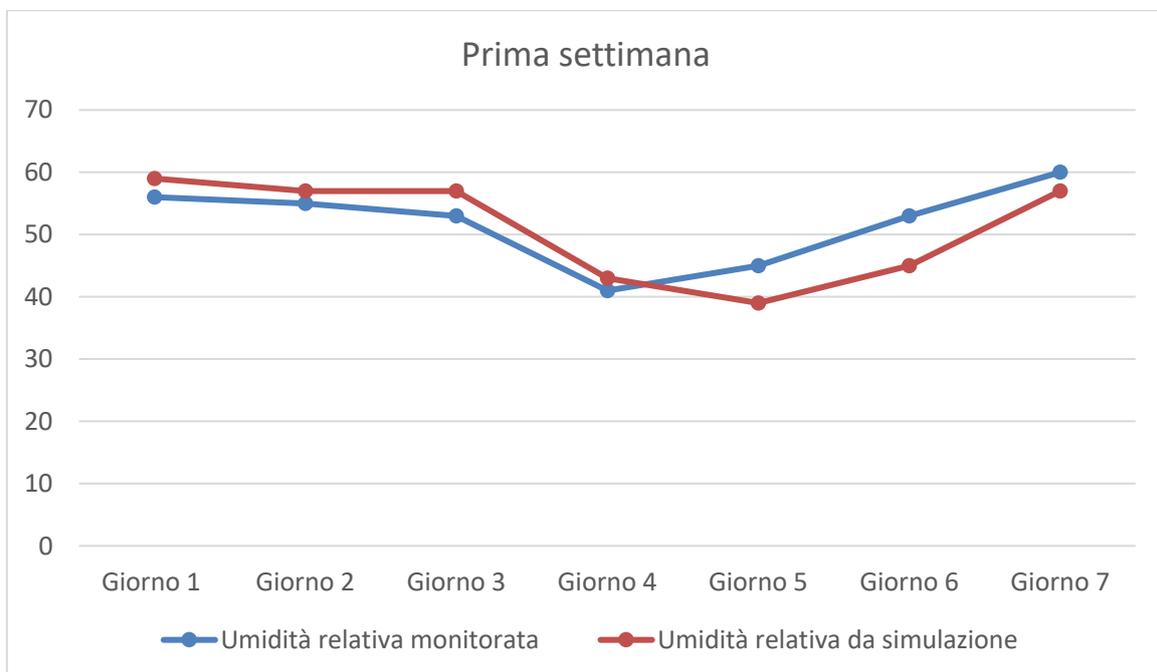


Figura 12. Confronto tra l'umidità relativa media giornaliera da monitoraggio e da simulazione per la prima settimana di riferimento.

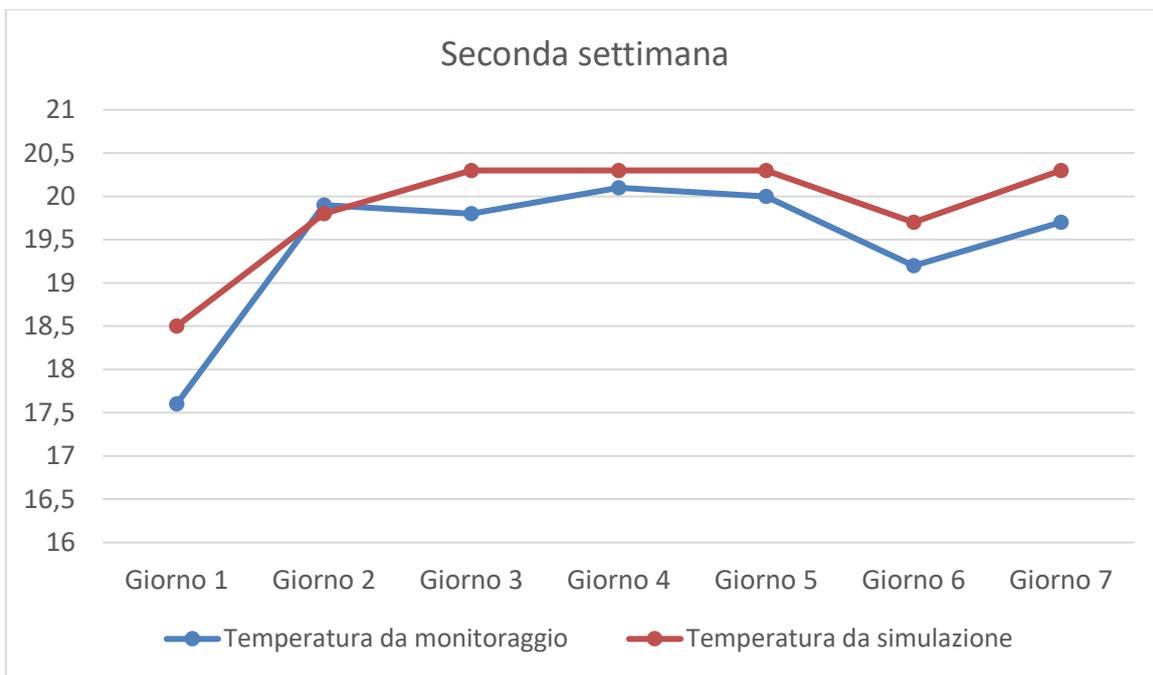


Figura 13. Confronto tra la temperatura media giornaliera da monitoraggio e da simulazione per la seconda settimana di riferimento.

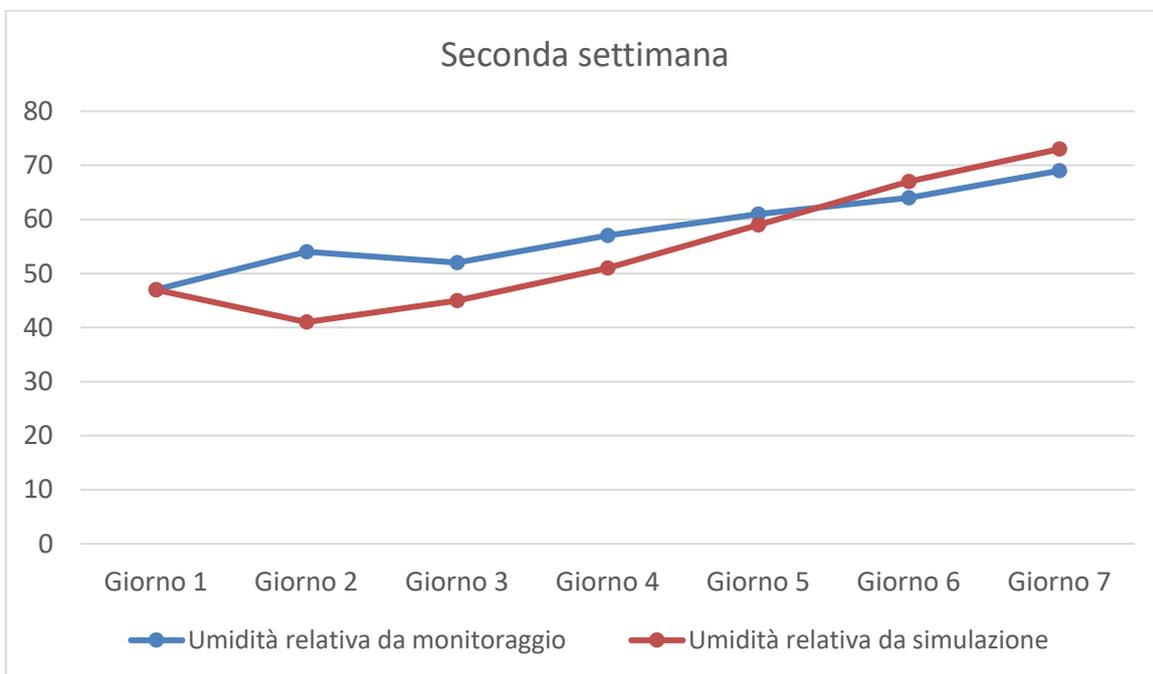


Figura 14. Confronto tra l'umidità relativa media giornaliera da monitoraggio e da simulazione per la seconda settimana di riferimento.

Anche a livello di valore medio settimanale è stato riscontrato un ottimo risultato, come dimostra la Tabella 4.

Tabella 4. Confronto tra l'umidità relativa media settimanale da monitoraggio e da simulazione per le due settimane di riferimento.

	Temperatura [°C]		Umidità relativa [%]	
	Prima settimana	Seconda settimana	Prima settimana	Seconda settimana
Dati di monitoraggio	22.0	19.5	52	57
Dati di simulazione	22.1	19.9	51	55

4.2 Analisi dello stato di comfort su un anno di riferimento

È stato quindi possibile utilizzare il modello TRNSYS per condurre la simulazione su un intero anno, utilizzando come dati climatici quelli del CTI [19]. Per quanto riguarda i profili delle utenze, sono stati mantenuti quelli descritti dagli attuali inquilini, quindi con presenza nell'appartamento nelle ore serali, notturne e nella prima mattina dei giorni feriali e, invece, totale assenza nei giorni festivi. Contestualmente, sono stati inseriti anche gli apporti interni dovuti all'uso di elettrodomestici e uso cucina.

Come output della simulazione è stato richiesto:

- PMV e PPD nella stagione invernale, utilizzando un valore di abbigliamento pari a 1 clo (tipico abbigliamento invernale) e valore metabolico 1.2 met;
- Temperatura media radiante per tutto l'anno;
- Temperatura operativa per tutto l'anno;
- Temperatura dell'aria per tutto l'anno;
- Umidità relativa per tutto l'anno.

L'andamento della temperatura dell'aria per tutto l'anno è riportato in Figura 15.

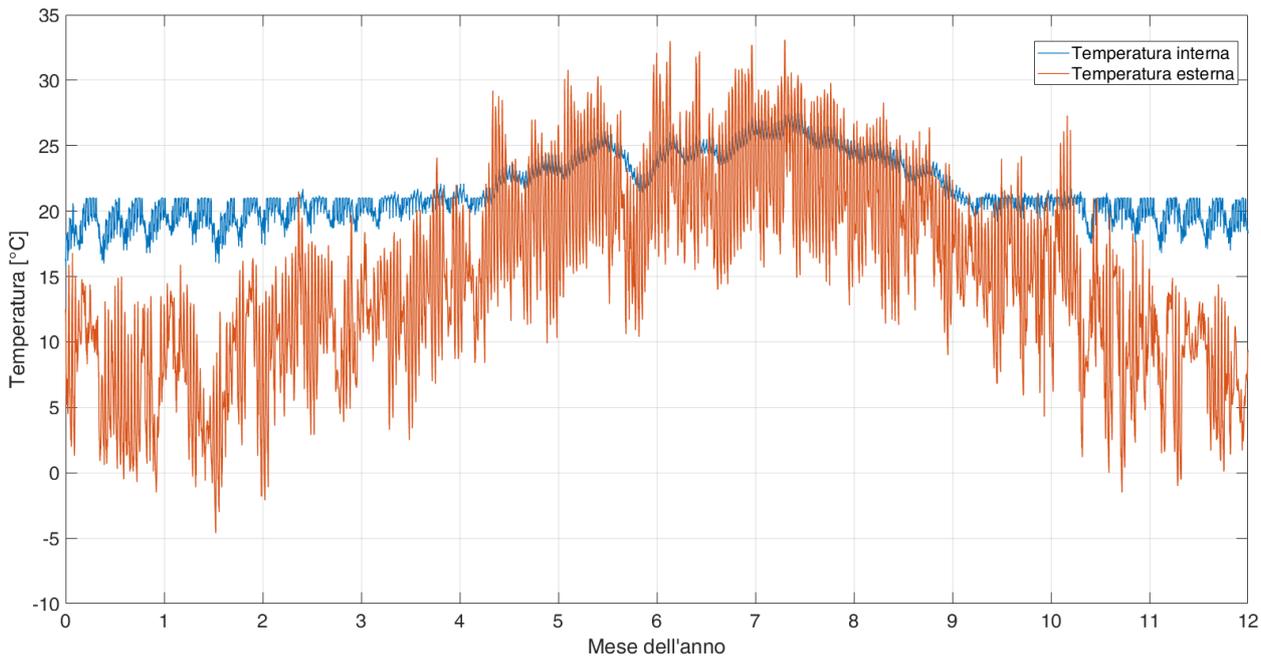


Figura 15. Profilo di temperatura interna ed esterna per la simulazione annuale nello stato di fatto.

È stato suddiviso l’anno di simulazione in due periodi, a seconda della necessità o meno di accensione dell’impianto di riscaldamento per mantenere la temperatura di setpoint (21 °C) negli orari impostati. Nel periodo invernale la temperatura dell’aria all’interno dell’abitazione si mantiene al di sopra di 20 °C per più del 50% del tempo (si veda la Figura 16).

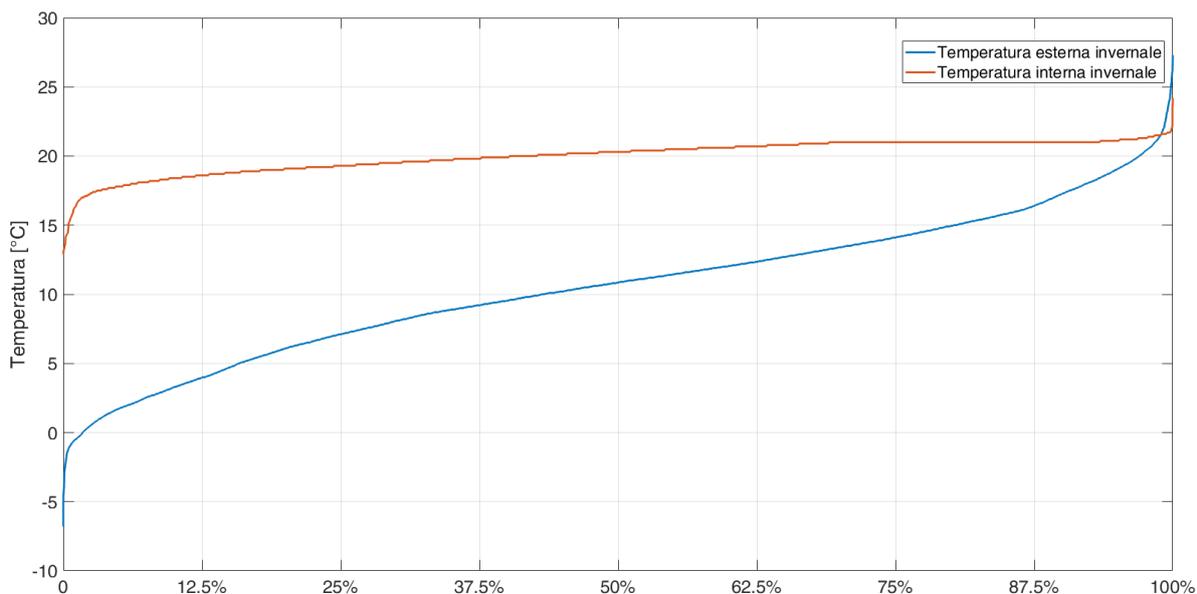


Figura 16. Frequenza cumulata della temperatura esterna ed interna nella stagione invernale.

Nel periodo di accensione dell’impianto è stato valutato il valore medio degli indici di Fanger (PMV e PPD).

Il profilo dell'andamento degli indicatori è riportato in Figura 17.

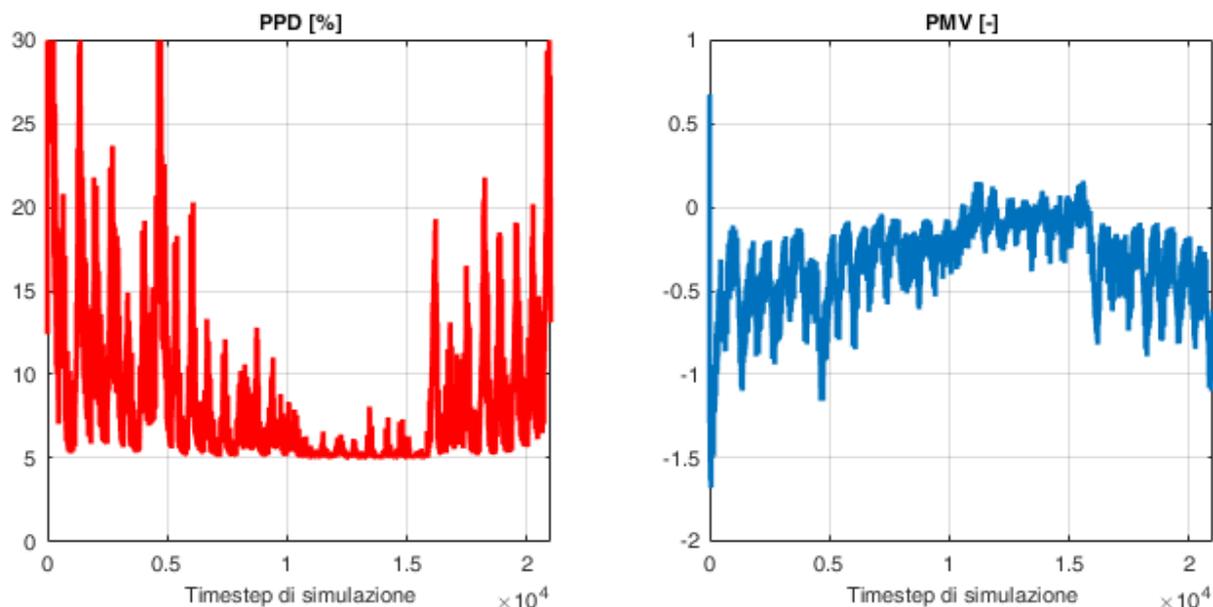


Figura 17. Andamento degli indici di Fanger nel periodo invernale.

Si nota che il massimo discomfort si ottiene nei periodi più rigidi della stagione invernale, con punte del 30% del PPD. In generale, il PMV si attesta su valori medi negativi, il che significa che gli occupanti percepiscono freddo all'interno dell'edificio, nonostante la temperatura dell'aria sia mediamente confortevole. La Tabella 5 riporta i valori medi mensili degli indici di Fanger nella stagione invernale.

Tabella 5. Valori medi mensili degli indici di Fanger nella stagione invernale.

	PMV [-]	PPD [%]
Gennaio	-0.7	14
Febbraio	-0.4	7
Marzo	-0.2	6
Aprile	0.2	7
Novembre	-0.2	7
Dicembre	-0.5	10

L'indice PMV è inoltre stato riportato su un carpet plot, riportando sull'asse delle ascisse le ore del giorno e sull'asse delle ordinate i giorni di riscaldamento, per verificare periodi ricorrenti di discomfort. Il grafico è riportato in Figura 18. Si nota che il PMV è sempre leggermente minore nelle ore pomeridiane (banda verticale centrale), per poi aumentare di nuovo nella sera, e anche nel fine-settimana (bande orizzontali). La diminuzione del comfort è dovuta alle modalità di utilizzo del sistema di riscaldamento, spento nelle ore

diurne e nel weekend per l'assenza degli utenti. Di conseguenza, anche le ore in cui il PMV risulta minore sono comunque quelle in cui gli utenti non risultano essere presenti nell'abitazione.

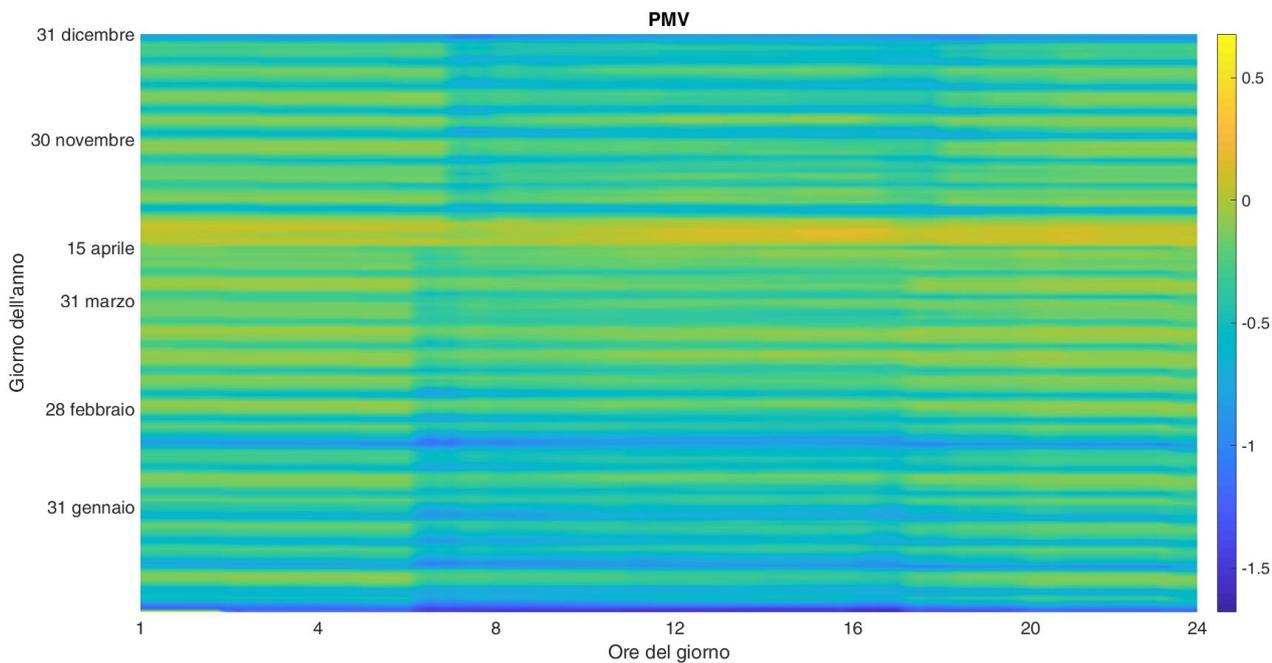


Figura 18. Periodicità del PMV nelle ore del giorno e nei giorni della settimana, nel caso attuale.

Inoltre la frequenza cumulata del PMV è stata riportata nel grafico in Figura 19. Si nota che, in generale, il PMV ha valori buoni, mantenendosi su valori negativi ma comunque maggiori di -1 per quasi tutta la durata del periodo di riscaldamento. Si veda anche la Tabella 6, dove sono riportati i valori dei percentili di PMV.

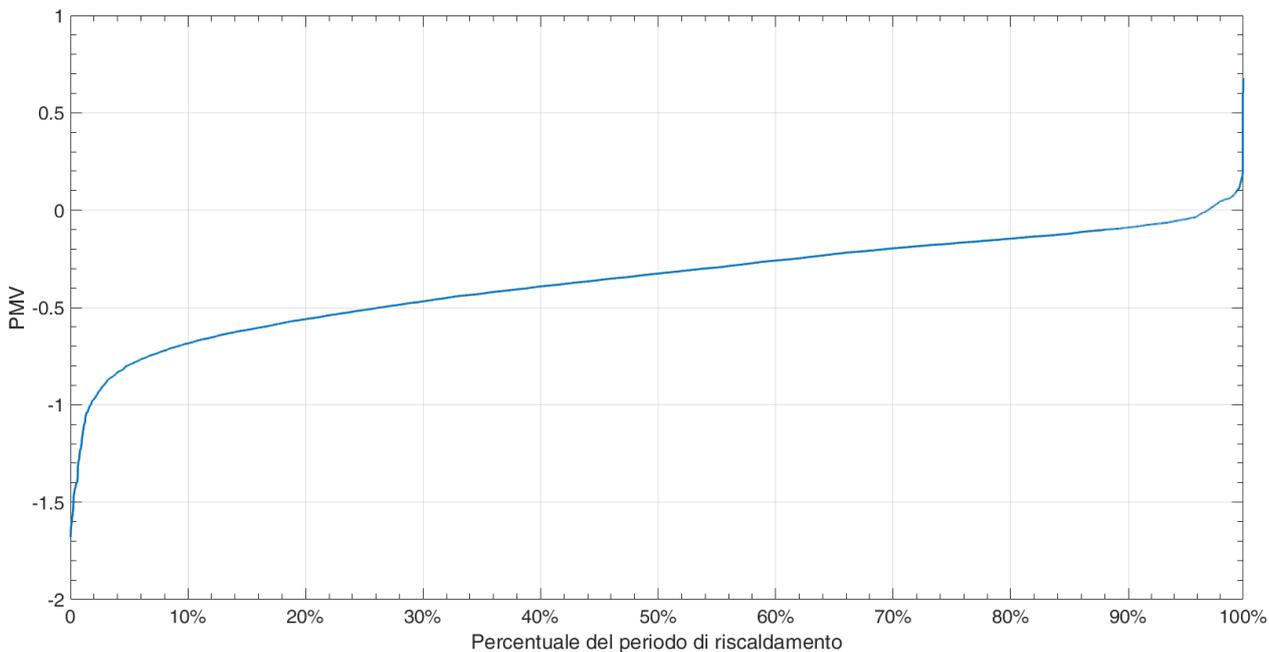


Figura 19. Frequenza cumulata di PMV sulla stagione di riscaldamento.

Tabella 6. Percentili di PMV allo stato attuale.

Percentile	Valore del PMV
5%	-0.80
25%	-0.51
50%	-0.33
75%	-0.17
95%	-0.05
97%	0

Per quanto riguarda invece il comfort nei mesi estivi, è stato usato sempre il metodo adattivo, usando però la temperatura operativa al posto di quella dell'aria, usando gli output di TRNSYS. Le categorie individuate sono sempre quelle riportate dalla EN 15251 [15]. I risultati della simulazione per il periodo da maggio a ottobre sono riportati nel grafico di Figura 20.

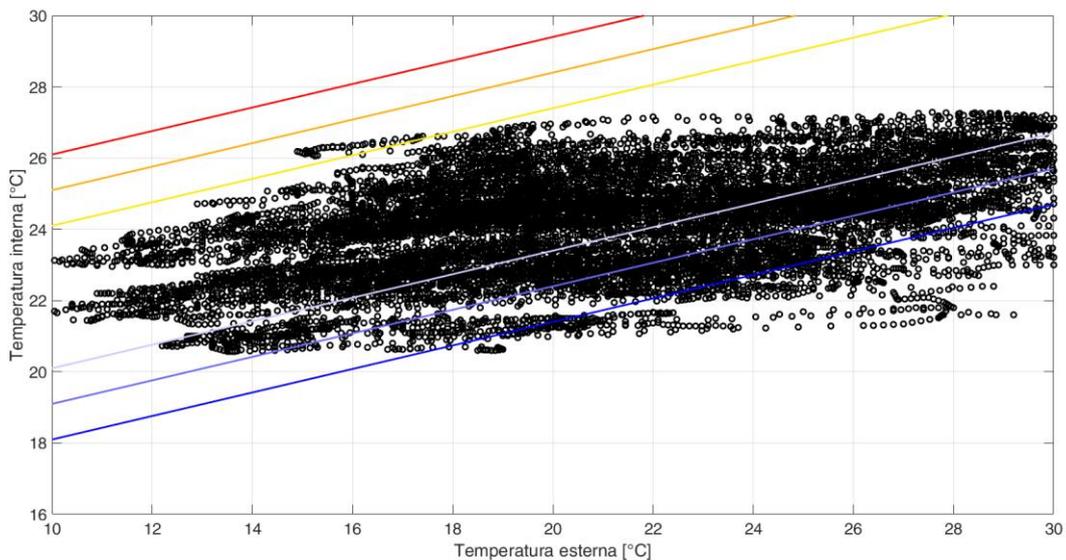


Figura 20. Comfort adattivo per la stagione estiva nella simulazione annuale dello stato di fatto.

La Figura 20 evidenzia che, durante il periodo estivo, il discomfort è dovuto principalmente ad una temperatura operativa troppo bassa rispetto alla temperatura esterna. La mancanza di un impianto di climatizzazione, quindi, non è correlato al discomfort. Piuttosto, l'involucro molto disperdente porta alla diminuzione della temperatura interna sia dell'aria sia delle pareti. Le percentuali di tempo passate nelle 4 categorie riportate dalla norma tecnica EN 15251 sono riportate in Tabella 7. Per un'analisi più di dettaglio, le categorie 2, 3 e 4 sono state a loro volta suddivise in due sottocategorie, a seconda che la relativa temperatura media operativa fosse maggiore o minore della temperatura di comfort alla stessa temperatura

esterna (si veda la Figura 21 per l'identificazione delle categorie). I risultati di questa ulteriore analisi sono riportati in Tabella 8.

Tabella 7. Indici di comfort adattivo per la simulazione dello stato di fatto.

Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
58.2%	23.2%	12.9%	5.7%

Tabella 8. Caratterizzazione dello stato di comfort nel periodo estivo.

Zona di comfort – Categoria 1	Categoria 2 A	Categoria 3 A	Categoria 4 A	Categoria 2 B	Categoria 3 B	Categoria 4 B
58.2%	22.9%	12.9%	5.7%	0.3%	0%	0%

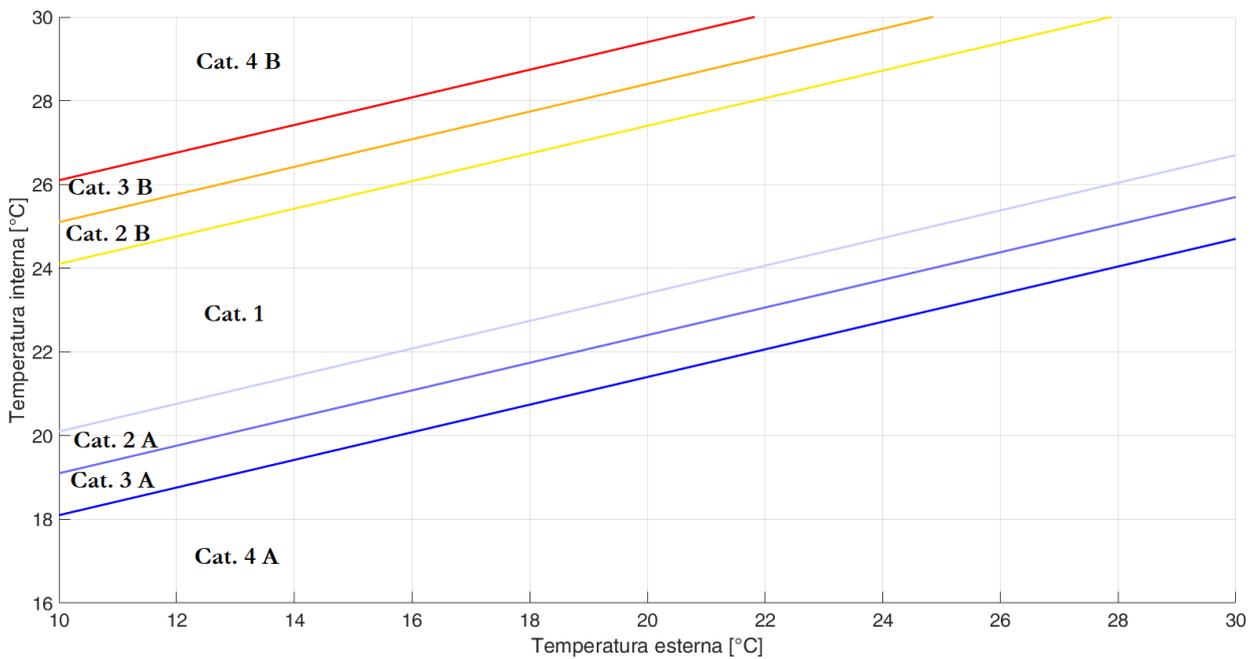


Figura 21. Definizione delle categorie per l'analisi dettagliata del comfort estivo.

5 Analisi dello stato di comfort dopo gli interventi di retrofit

Un'ulteriore simulazione è servita per verificare lo stato di comfort interno all'unità abitativa ipotizzando di eseguire gli interventi di riqualificazione per portare l'edificio a NZEB. Nel corso dell'attività [1], sia l'analisi con software CTI sia l'analisi costi-benefici avevano evidenziato alcuni interventi ritenuti necessari per la riduzione dei consumi energetici. In questa sede, sono stati considerati gli stessi interventi all'involucro proposti per l'appartamento per la riduzione delle richieste energetiche, in altre parole:

- installazione di cappotto esterno sulle pareti perimetrali;
- installazione di cappotto interno sulla parete confinante con il vano scala;
- sostituzione delle attuali finestre in singolo vetro con finestra in triplo vetro.

Le nuove stratigrafie delle pareti esterne e della parete confinante con il vano scale sono riportate nelle Tabelle 9-10-11, evidenziando in azzurro i due strati aggiuntivi ipotizzati rispetto allo stato attuale.

Tabella 9. Stratigrafia della parete esterna (spessore 31 cm), con evidenziati in blu gli strati aggiunti in seguito agli interventi di riqualificazione.

Parete esterna (stato di fatto: spessore 31 cm → NZEB: spessore 40.5 cm)					
Descrizione	Conducibilità [W/mK]	Spessore [m]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [J/kgK]	Fattore di resistenza al vapore
Intonaco calce e cemento	0.900	0.015	1800	840	38
Muratura in mattoni	0.297	0.080	800	840	8
Intercapedine	0.510	0.080	1.3	1000	1
Muratura in mattoni	0.544	0.120	1200	840	8
Intonaco calce e cemento	0.900	0.015	1800	840	38
Isolante in schiuma di polyso	0.028	0.080	35	1460	56
Intonaco	0.900	0.015	1800	840	38

Tabella 10. Stratigrafia della parete esterna (spessore 27 cm), con evidenziati in blu gli strati aggiunti in seguito agli interventi di riqualificazione.

Parete esterna (stato di fatto: spessore 27 cm → NZEB: spessore 36.5 cm)					
Descrizione	Conducibilità [W/mK]	Spessore [m]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [J/kgK]	Fattore di resistenza al vapore
Intonaco calce e cemento	0.900	0.015	1800	840	38
Muratura in mattoni	0.297	0.080	800	840	8
Intercapedine	0.260	0.040	1.3	1000	1
Muratura in mattoni	0.544	0.120	1200	840	8
Intonaco calce e cemento	0.900	0.015	1800	840	38
Isolante in schiuma di polyso	0.028	0.080	35	1460	56
Intonaco	0.900	0.015	1800	840	38

Tabella 11. Stratigrafia della parete verso vano scale, con evidenziati in blu gli strati aggiunti in seguito agli interventi di riqualificazione.

Parete confinante con vano scale					
Descrizione	Conducibilità [W/mK]	Spessore [m]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [J/kgK]	Fattore di resistenza al vapore
Intonaco	0.900	0.015	1800	840	38
Isolante in schiuma di polyso	0.028	0.080	35	1460	56
Intonaco calce e cemento	0.900	0.015	1800	840	38
Muratura in mattoni	0.544	0.120	1200	840	8
Intercapedine	0.260	0.040	1.3	1000	1
Muratura in mattoni	0.297	0.080	800	840	8
Intonaco calce e cemento	0.900	0.015	1800	840	38

Per quanto riguarda la finestra, si è ipotizzato di utilizzare un infisso in triplo vetro di stratigrafia 5.7/6.4/5.7/6.4/5.7 con trasmittanza $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ e fattore solare g pari a 0.56, presente nella libreria TRNSYS. È inoltre stato inserito un fattore di riduzione degli apporti solari sull'interno, dovuto alla presenza di una veneziana bianca interna con fattore di trasmissione 0.3.

È importante sottolineare che, anche in questa simulazione, sono stati mantenuti i profili di utilizzo dell'appartamento applicati nella simulazione dello stato di fatto, sia in termini di apporti interni non gratuiti (utilizzo di apparecchiature elettriche, uso cucina), sia in termini di apertura finestre per ventilazione dei locali e utilizzo delle chiusure oscuranti.

Gli output della simulazione sono stati, come nel caso precedente:

- PMV e PPD nella stagione invernale, utilizzando un valore di abbigliamento pari a 1 clo (tipico abbigliamento invernale) e valore metabolico 1.2 met;
- Temperatura media radiante per tutto l'anno;
- Temperatura operativa per tutto l'anno;
- Temperatura dell'aria per tutto l'anno;
- Umidità relativa per tutto l'anno.

Nel periodo invernale, è stato calcolato il valore medio mensile degli indici di Fanger. Si riporta, in tabella 12, il confronto di questi indici tra lo stato di fatto e lo stato modificato a valle delle proposte NZEB.

Tabella 12. Valori medi mensili degli indici di Fanger: confronto tra stato di fatto e soluzione NZEB.

	PMV [-]		PPD [%]	
	Stato di fatto	NZEB	Stato di fatto	NZEB
Gennaio	-0.7	-0.3	14	8
Febbraio	-0.4	-0.2	7	6
Marzo	-0.2	-0.1	6	5
Aprile	0.2	0	7	5
Novembre	-0.2	-0.1	7	5
Dicembre	-0.5	-0.2	10	6
Totale annuale	-0.3	-0.1	8	6

I risultati in Tabella 12 mostrano che, nei mesi invernali, l'installazione dell'isolamento termico sulle pareti disperdenti e del triplo vetro portano alla riduzione della percentuale degli insoddisfatti e quindi ad un miglioramento del comfort termico degli occupanti. In Figura 22 è riportato un grafico per il confronto delle frequenze cumulate della temperatura interna nei due casi (stato di fatto e caso riqualificato). Si nota un

leggero innalzamento della temperatura interna dopo gli interventi di riqualificazione, per cui la temperatura interna è più costante nel periodo invernale.

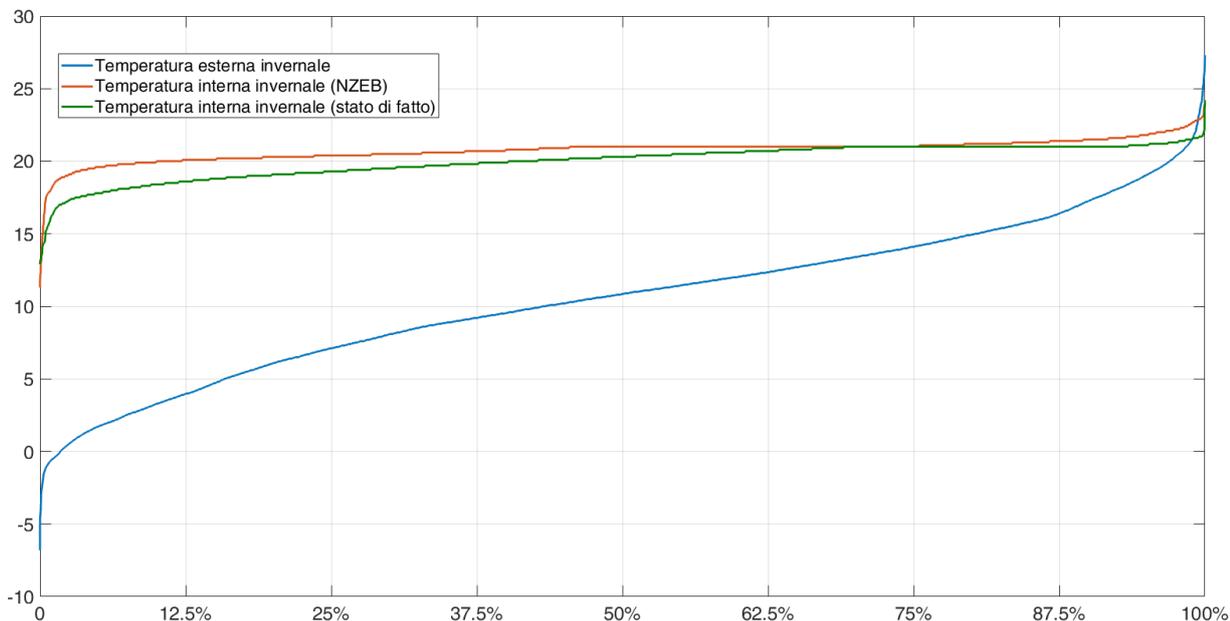


Figura 22. Cumulata delle temperatura interne invernali allo stato di fatto e nel caso riqualificato.

In analogia all’analisi effettuata per lo stato attuale, si è verificata la presenza di periodicità giornaliere o settimanali di discomfort tramite il carpet plot riportato in Figura 23. A differenza del caso precedente, il grafico mostra un indicatore molto più costante ed indipendente sia dall’ora del giorno che dal giorno della settimana.

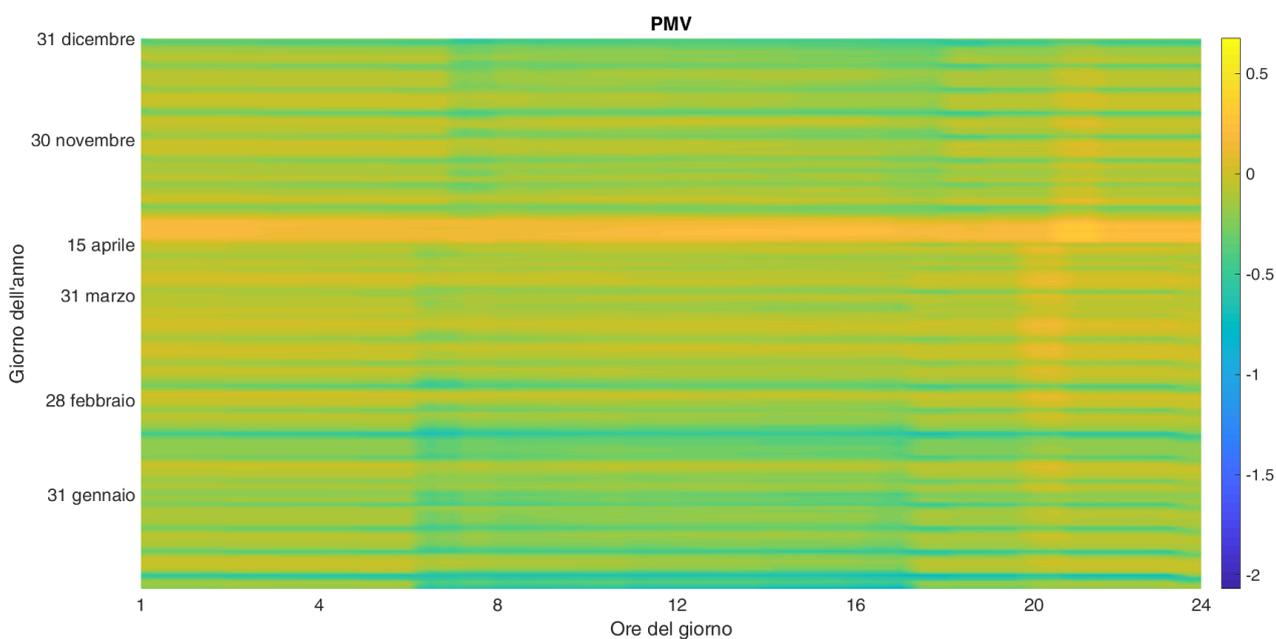


Figura 23. Periodicità del PMV nelle ore del giorno e nei giorni della settimana, nel caso riqualificato.

Anche per quanto riguarda la frequenza cumulata del PMV, si nota un andamento più costante su tutta la stagione invernale: si veda la Figura 24, dove i risultati del caso riqualificato sono confrontati con quelli dello stato di fatto. In Tabella 13 sono inoltre riportati i percentili di PMV sia nel caso riqualificato sia nel caso attuale. Benché i valori di PMV fossero accettabili anche allo stato di fatto, si nota che grazie agli interventi di riqualificazione è possibile avere un comfort molto più omogeneo durante tutto il periodo di riscaldamento.

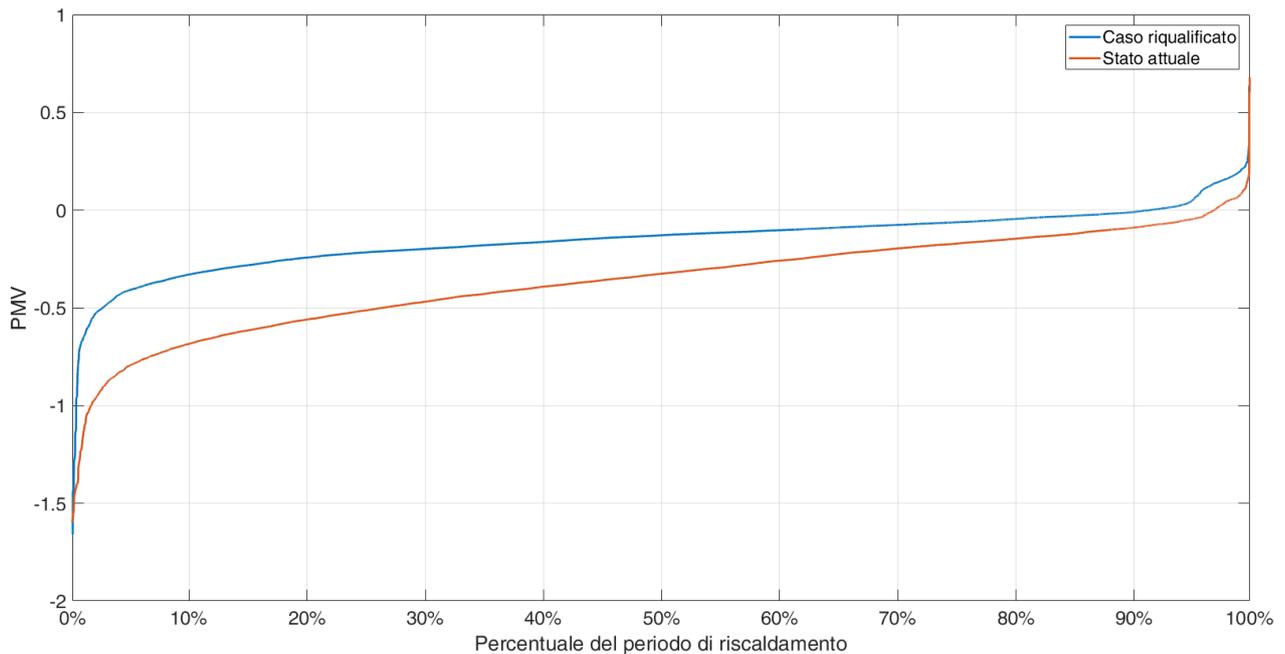


Figura 24. Frequenza cumulata del PMV nel caso attuale e nel caso riqualificato.

Tabella 13. Confronto tra percentili di PMV, caso riqualificato e stato attuale.

Percentile	Valore del PMV (stato di fatto)	Valore del PMV (caso riqualificato)
5%	-0.80	-0.41
25%	-0.51	-0.22
50%	-0.33	-0.13
75%	-0.17	-0.06
91%	-0.08	0
95%	-0.05	0.04
97%	0	0.14

La Figura 25 riporta i dati della simulazione dinamica per la stagione estiva, per la quale è stato adottato il metodo adattivo.

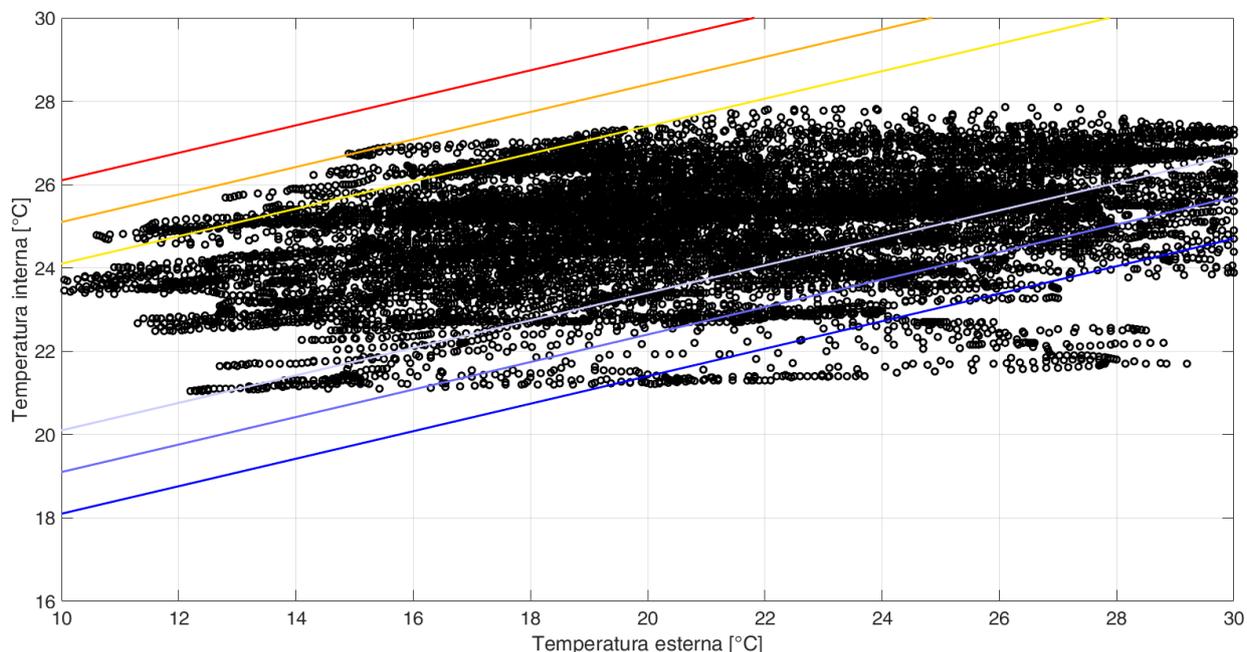


Figura 25. Comfort adattivo per la stagione estiva nella simulazione annuale dello stato riqualificato.

Come nel caso precedente, la distribuzione dei punti di simulazione nelle quattro categorie riportata in EN 15251 è riportata in Tabella 14, confrontando le percentuali relative allo stato di fatto e quelle del caso NZEB. In generale, si nota un aumento dei punti di simulazione appartenenti alla categoria 1, cioè quella di comfort. Diminuiscono invece i punti appartenenti a tutte e tre le altre categorie. Da un’analisi più di dettaglio, però, si nota una diminuzione dei punti appartenenti alle categorie 2 A, 3 A e 4 A, mentre aumentano i punti appartenenti alle categorie 2 B e 3 B (si veda la Figura 21 per l’identificazione delle categorie). Ciò significa che la temperatura operativa all’interno dell’appartamento è aumentata come effetto delle modifiche introdotte per portare a NZEB l’edificio. Si confrontino i risultati in Tabella 15.

Tabella 14. Confronto tra gli indici di comfort adattivo per la stagione estiva, nel caso dello stato di fatto e nel caso riqualificato.

	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
Stato di fatto	58.2%	23.2%	12.9%	5.7%
NZEB	76.9%	15.7%	5.1%	2.3%

Tabella 15. Caratterizzazione dello stato di comfort nel periodo estivo, confronto tra stato di fatto e caso NZEB.

	Stato di fatto	NZEB
Zona di comfort – Categoria 1	58.2%	76.9%
Categoria 2 A	22.9%	11.5%
Categoria 3 A	12.9%	4.9%
Categoria 4 A	5.7%	2.3%
Categoria 2 B	0.3%	4.2%
Categoria 3 B	0%	0.2%
Categoria 4 B	0%	0%

In sintesi, l'applicazione degli interventi NZEB porta ad un aumento del comfort termico nella stagione invernale, ma ad una sua moderata diminuzione d'estate. Si sono scelti quattro output del sistema per verificare come varino le temperature che possono influenzare il comfort degli occupanti:

- temperatura dell'aria;
- temperatura media radiante di una finestra esposta a sud-ovest;
- temperatura media radiante di una parete esposta a sud-ovest;
- temperatura media radiante di una parete esposta a nord-est.

Per questi quattro output, è stato effettuato il confronto mensile prima e dopo gli interventi di riqualificazione. Si veda la Tabella 16 e le Figure 26-27-28-29.

Tabella 16. Parametri di confronto tra stato di fatto e caso NZEB, in termini di comfort.

	Temperatura dell'aria [°C]		Temperatura finestra [°C]		Temperatura parete sud-ovest [°C]		Temperatura parete nord-est [°C]	
	Stato di fatto	NZEB	Stato di fatto	NZEB	Stato di fatto	NZEB	Stato di fatto	NZEB
Gennaio	18.7	20.1	10.4	18.7	18.0	18.9	17.8	18.8
Febbraio	19.6	20.5	10.8	19.3	18.9	20.3	18.7	20.2
Marzo	20.3	20.7	13.0	20.0	19.7	20.6	19.5	20.5
Aprile	20.6	21.0	14.5	20.6	20.2	20.8	20.1	20.8
Maggio	22.1	22.4	18.0	22.7	21.8	22.2	21.7	22.2
Giugno	23.9	24.8	20.2	25.1	23.7	24.7	23.6	24.7
Luglio	24.7	25.7	21.8	26.1	24.5	25.5	24.4	25.5
Agosto	25.9	26.9	22.4	27.3	25.7	26.8	25.5	26.7
Settembre	23.5	25.2	19.6	25.2	23.3	25.1	23.1	25.0
Ottobre	20.8	21.9	16.0	21.6	20.4	21.8	20.2	21.7
Novembre	20.3	20.8	13.6	20.3	19.8	20.7	19.5	20.6
Dicembre	19.5	20.5	10.9	19.4	18.8	20.3	18.6	20.2

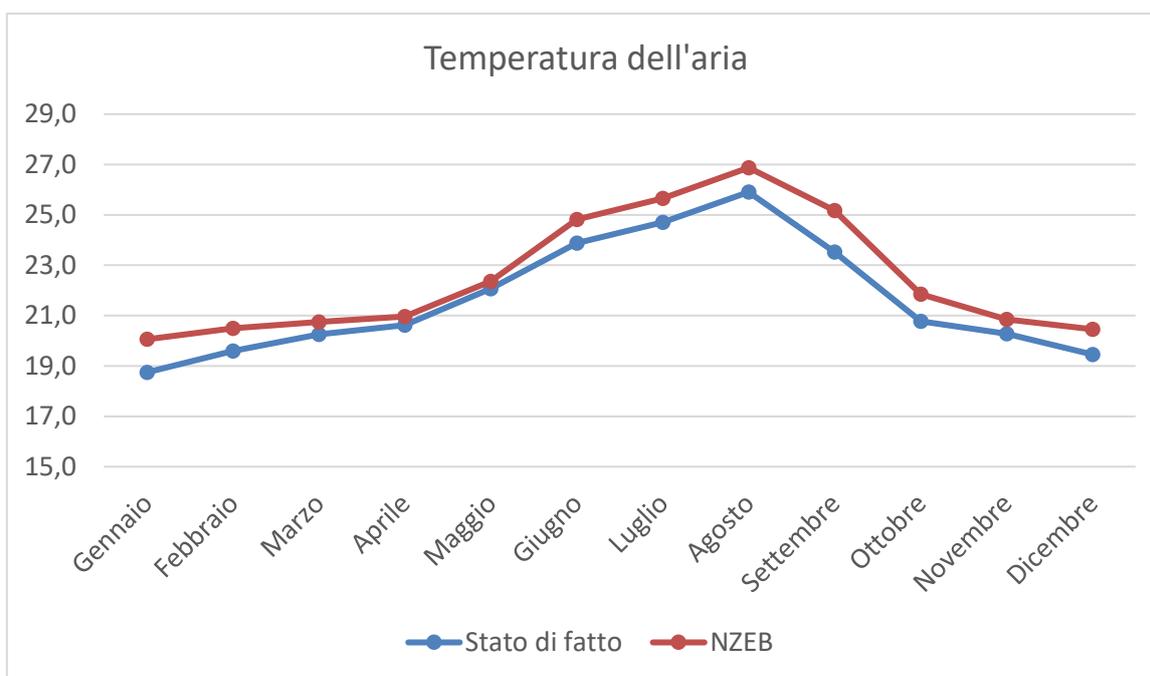


Figura 26. Temperatura dell'aria: confronto tra stato di fatto e soluzione NZEB.

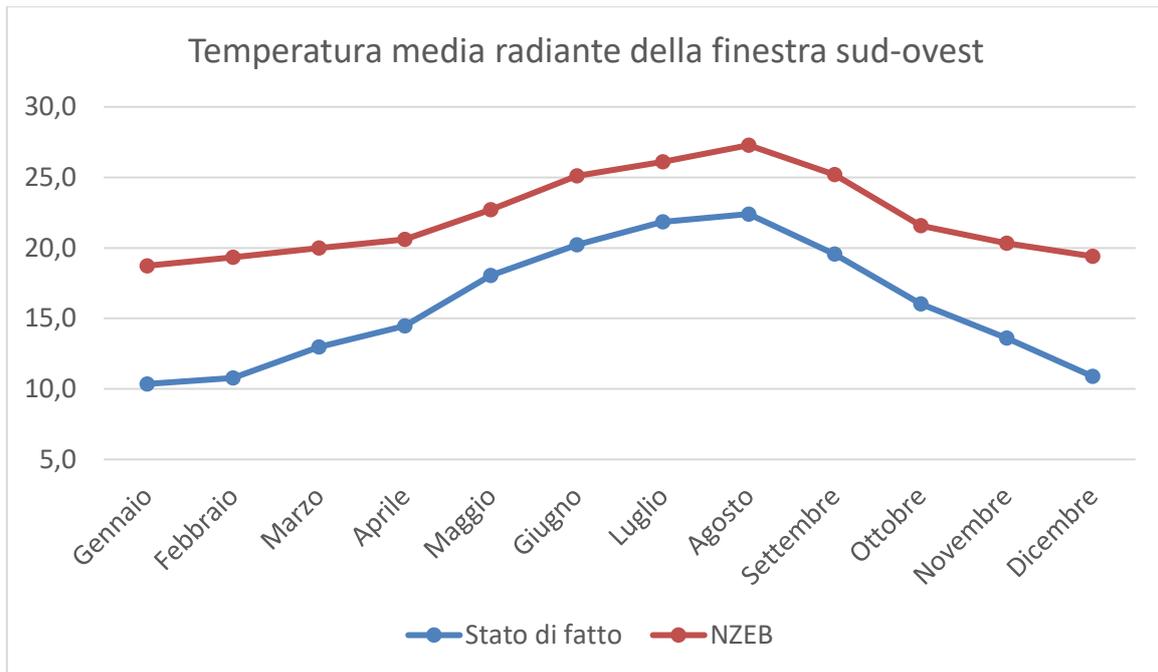


Figura 27. Temperatura media radiante della finestra: confronto tra stato di fatto e soluzione NZEB.

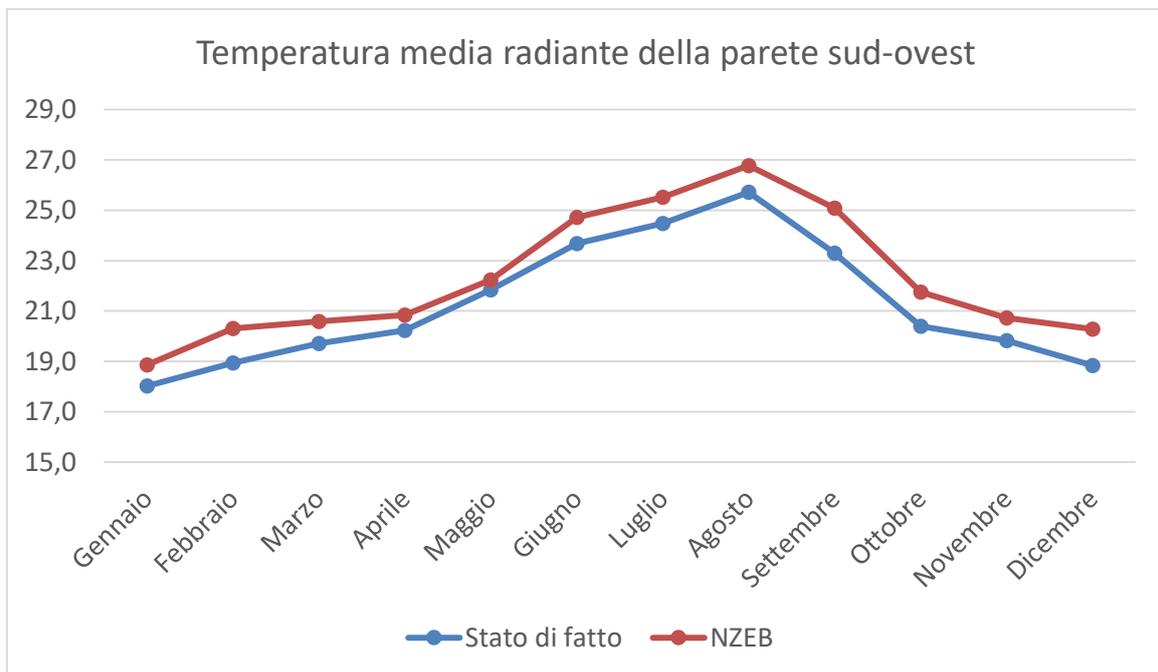


Figura 28. Temperatura media radiante della parete sud-ovest: confronto tra stato di fatto e soluzione NZEB.

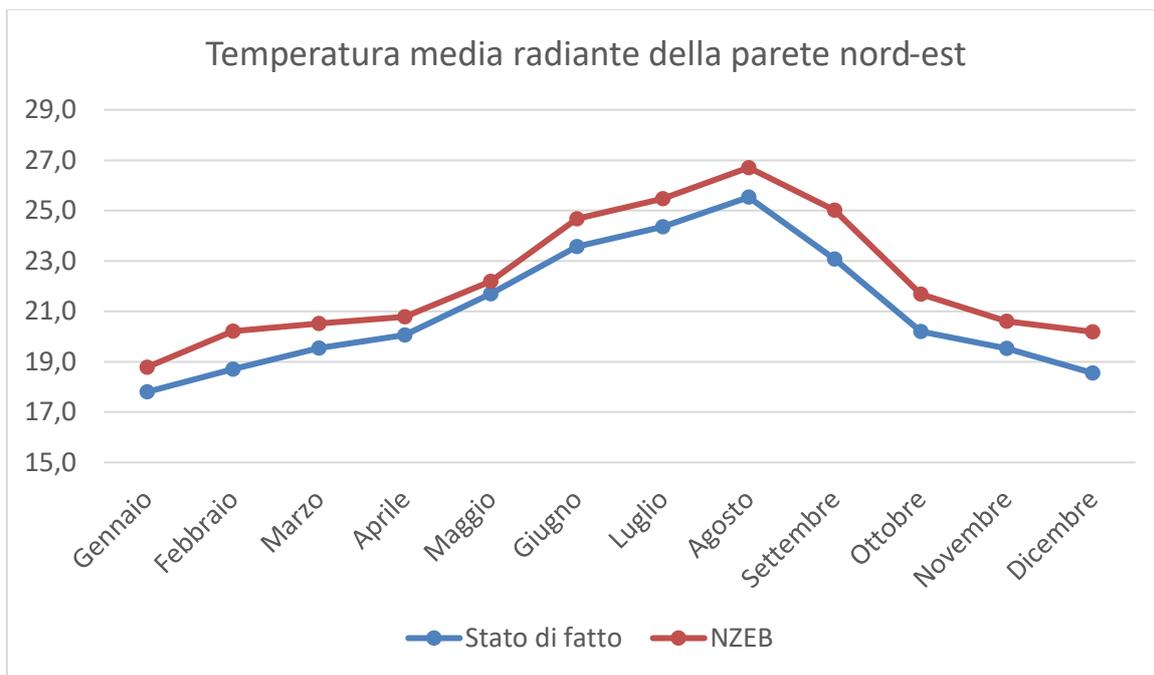


Figura 29. Temperatura media radiante della parete nord-est: confronto tra stato di fatto e soluzione NZEB.

Dall’analisi dei risultati si nota che il cambiamento più significativo si verifica a livello della temperatura media radiante della finestra, che aumenta anche di 10 °C rispetto al caso singolo vetro. Sia la temperatura dell’aria che quella delle altre pareti aumentano di percentuali meno significative.

6 Conclusioni

Il presente lavoro si è posto l'obiettivo di analizzare il comfort all'interno degli edifici ERP nella zona climatica D. È stato scelto un caso studio rappresentativo della Provincia di Pisa, simile ad altri 450 appartamenti nel quartiere in cui si trova, per il quale era stato svolto precedentemente uno studio per valutare la fattibilità di renderlo NZEB. Gli stessi interventi ipotizzati per lo studio precedente (scelti sia per rispettare la legislazione in vigore sia in base ad una ottimizzazione costi-benefici) sono stati considerati anche in questo studio, verificando se oltre ad un miglioramento energetico portassero anche ad un miglioramento delle condizioni di comfort per gli occupanti.

L'analisi del comfort interno è stata svolta tramite simulazione dinamica, usando un modello TRNSYS validato con dati sperimentali ottenuti da una campagna di monitoraggio nell'appartamento durante il periodo autunnale-invernale. I modelli utilizzati sono quello di Fanger nel periodo di riscaldamento e quello adattivo nel periodo estivo, in cui non è presente un impianto di climatizzazione nell'appartamento.

Nella situazione attuale, benché l'edificio non risulti isolato, le condizioni di comfort durante l'inverno sono assicurate dall'utilizzo dell'impianto di riscaldamento; nelle ore di non utilizzo, si verifica una diminuzione degli indicatori di riferimento, che però si mantengono al di sopra dei valori limite di comfort. Anche d'estate, la temperatura interna a volte eccessivamente bassa rispetto a quella esterna può portare a limitate condizioni di discomfort. La simulazione degli interventi di retrofit ha evidenziato che questi portano ad un miglioramento degli indicatori del comfort in inverno: anche mantenendo le stesse modalità di utilizzo dell'impianto di riscaldamento, la temperatura dell'aria e quella media radiante sono più costanti nel corso della giornata, riducendo la variazione di PMV giornaliera. In estate, la temperatura operativa aumenta all'interno dell'appartamento. Da un lato, questo riduce le ore in cui il discomfort si verifica per temperature interne basse rispetto alla temperatura esterna; dall'altro, però, sono emerse delle criticità dovute a temperature interne alte rispetto alla temperatura esterna.

In particolare si è verificato che l'installazione di infissi in triplo vetro porta ad un aumento significativo della temperatura media radiante interna. In un clima come quello della Provincia di Pisa, le variazioni di comfort dovute all'installazione di questi componenti sono limitate, mentre devono essere oggetto di attenta analisi in climi dove le esigenze di raffrescamento sono maggiori. In questo contesto, quindi, gli interventi di retrofit più opportuni potrebbero essere scelti in seguito ad analisi multi-obiettivo, considerando sia i miglioramenti energetici apportati all'edificio, sia i miglioramenti in termini di comfort per gli occupanti, ed allo stesso tempo minimizzando i costi totali.

Bibliografia

- [1] D. Testi, E. Schito, D. Allegra, M. Acernese, A. Eccher, P. Signoretti, D. Iatauro, Studio di un edificio di edilizia residenziale pubblica di riferimento nella zona climatica (zona D: $1.400 < GG \leq 2.100$), (2018) 99.
- [2] S.A. Klein, TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, 2016. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [3] R. Lungarella, Social housing: una definizione inglese di “edilizia residenziale pubblica”?, *Ist. Del Fed. Riv. Di Stud. Giuridici e Polit.* 3 (2010) 271–311.
- [4] Ministero delle Infrastrutture, Decreto 22 aprile 2008. Definizione di alloggio sociale ai fini dell'esenzione dall'obbligo di notifica degli aiuti di Stato, ai sensi degli articoli 87 e 88 del Trattato istitutivo della Comunità Europea., Italia, 2008.
- [5] Il Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea, Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica., (2012) 56.
- [6] Federcasa, L'edilizia residenziale pubblica, elemento centrale della risposta al disagio abitativo e all'abitazione sociale, Dossier. (2015) 21. http://www.federcasa.it/wp-content/uploads/2017/03/Edilizia_Residenziale_Pubblica_dossier_05_2015.pdf (accessed December 27, 2018).
- [7] E. Antonini, J. Gaspari, G. Olivieri, Densifying to upgrading: strategies for improving the social housing built stock in Italy., *TECHNE J. Technol. Archit. Environ.* 4 (2012) 306. <http://ezproxy.uow.edu.au/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=87766194&site=eds-live>.
- [8] M. Corsetti, Retrofitting energetico per l'housing sociale, (2011) 34–40.
- [9] J.D. Healy, J.P. Clinch, Fuel poverty, thermal comfort and occupancy: results of a national household-survey in Ireland, *Appl. Energy.* 73 (2002) 329–343.
- [10] C. Liddell, C. Morris, Fuel poverty and human health: A review of recent evidence, *Energy Policy.* 38 (2010) 2987–2997. doi:10.1016/j.enpol.2010.01.037.
- [11] N. Shortt, J. Rugkasa, “The walls were so damp and cold” fuel poverty and ill health in Northern Ireland: Results from a housing intervention, *Heal. Place.* 13 (2007) 99–110. doi:10.1016/j.healthplace.2005.10.004.
- [12] J.D. Healy, J.P. Clinch, Quantifying the severity of fuel poverty, its relationship with poor housing and reasons for non-investment in energy-saving measures in Ireland, *Energy Policy.* 32 (2004) 207–220.
- [13] G.L. Brunetti, A. Delera, E. Ronda, Il risparmio energetico nell'edilizia residenziale pubblica. Politiche,

progetti e strumenti., Santarcangelo di Romagna, 2011.

- [14] D.P. Jenkins, The value of retrofitting carbon-saving measures into fuel poor social housing, *Energy Policy*. 38 (2010) 832–839. doi:10.1016/j.enpol.2009.10.030.
- [15] European Committee for Standardization (CEN), EN 15251. Criteri per la progettazione dell’ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell’aria interna, all’ambiente termico, all’illuminazione e all’acustica., (2008) 57.
- [16] S.A. Klein, Moisture balance, in: *TRNSYS 17 A Transient Syst. Simul. Progr.*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 2010. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [17] J. Woods, J. Winkler, D. Christensen, Moisture Penetration Depth Model for Estimating Moisture Buffering in Buildings, Golden, Colorado, 2013. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57441.pdf>.
- [18] International Organization for Standardization, ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria., (2005).
- [19] ENEA, Ministero dello sviluppo economico, Anni tipo climatici, (2015). <https://try.cti2000.it/>.

Breve curriculum scientifico dei membri del gruppo di lavoro

Daniele Testi, nato a Pietrasanta (LU) nel 1977, dal 2014 è Professore Associato di Fisica Tecnica presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa. Laureato con lode in Ingegneria Aerospaziale (2002), Dottore di Ricerca in Energetica Elettrica e Termica (2006), Assegnista di Ricerca (2006-2009), Borsista di Ricerca (2010-2011) e Ricercatore Universitario a tempo indeterminato (2011-2014) presso l'Università di Pisa. Dal 2018 è Abilitato alle funzioni di Professore di Prima Fascia (Ordinario) nel Settore "Fisica Tecnica e Ingegneria Nucleare". Ha svolto supporto alla didattica per i corsi di Termodinamica Applicata, Fisica Tecnica e Termoenergetica dell'Edificio. È stato codocente dei corsi di Teoria dei Sistemi, Laurea in Ingegneria Energetica, e di Risparmio Energetico in Edilizia, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Attualmente è Presidente del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e docente dei corsi di Fisica Tecnica, Laurea in Ingegneria dell'Energia, Energia e Sistemi Energetici, Laurea in Ingegneria Gestionale, e Trasmissione del Calore e Termofluidodinamica, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Principali campi di studio: termofluidodinamica monofase e bifase, tecniche d'incremento dello scambio termico convettivo, tecniche di misura nella fisica tecnica, scambiatori e dissipatori di calore, microgravità, termofisica degli ambienti abitati, impianti di climatizzazione, efficienza energetica in edilizia, simulazione, integrazione e ottimizzazione di sistemi energetici, pianificazione energetica. Per la sua Tesi di Dottorato di Ricerca, ha ottenuto il premio europeo "EUROTHERM Young Scientist Award", conferito con cadenza quadriennale. Autore di oltre 100 pubblicazioni su riviste internazionali o in atti di congressi. Docente in numerosi corsi di formazione, master e seminari sulla gestione dell'energia, la diagnosi e la certificazione energetica degli edifici e gli impianti termotecnici. Titolare di consulenze o collaboratore per vari contratti di ricerca nell'ambito della diagnosi, dell'efficienza, della normativa, della pianificazione e della conversione energetica. Socio dell'Unione Italiana Termofluidodinamica (UIT) e dell'Associazione della Fisica Tecnica Italiana (FTI). Dal 2014 è responsabile scientifico dello sviluppo del software nazionale SEAS per la diagnosi energetica negli edifici.

Eva Schito, nata a Pisa nel 1990, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria dell'Energia, Sistemi, Territorio e Costruzioni presso l'Università di Pisa, nel giugno 2017, discutendo la tesi "Methods and tools for a rational and efficient use of energy in museum environments". Ha conseguito con lode la Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica presso l'Università di Pisa (luglio 2013), discutendo la tesi dal titolo "Modellizzazione dinamica di un sistema pompa di calore – edificio". Ha ottenuto l'Attestato di Merito previsto per gli studenti del Percorso di Eccellenza. Attualmente è Assegnista di Ricerca in Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni presso l'Università di Pisa e codocente del corso "Risparmio Energetico in Edilizia" del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. I suoi principali campi di interesse sono:

modellizzazione cycle-based delle pompe di calore e progettazione ottimizzata, simulazione dinamica e riqualificazione energetica degli edifici, anche di valore storico. Nel 2008 è risultata vincitrice del Primo Posto nella Categoria Singoli Studenti del Concorso Nazionale “IV Edizione delle Olimpiadi della Scienza – Premio Green Scuola – Energie alternative e ambiente: la produzione sostenibile di energia”, indetto dal Ministero dell’Istruzione, Università e Ricerca e dal Consorzio Interuniversitario “La Chimica per l’Ambiente” (INCA). Esperto Junior CasaClima e Socia FTI e dell’Associazione Italiana Condizionamento dell’Aria Riscaldamento e Refrigerazione (AiCARR). Ha collaborato come Borsista col DESTEC, Università di Pisa, nell’ambito di contratti di ricerca e consulenza nel campo della diagnosi e simulazione energetica degli edifici e dei sistemi energetici.

Davide Della Vista, nato a Cascina (PI) nel 1977, laureato con lode in Ingegneria Aerospaziale all’Università di Pisa (2004). Tecnico di laboratorio ed elaborazione dati dal 2004 presso il DESTEC, Università di Pisa, con esperienza nella realizzazione di programmi di acquisizione dati, nella messa a punto di apparecchiature sperimentali, nell’esecuzione di misure termofluidodinamiche e di monitoraggio energetico degli ambienti abitati e nella simulazione dinamica dei sistemi edificio – impianto. Ha collaborato alla stesura del Piano Energetico della Provincia di Pisa (2009) ed è autore di 7 pubblicazioni scientifiche su rivista internazionale.

Paolo Conti, nato a Jesi (AN) nel 1987, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria “Leonardo da Vinci” Energetica Elettrica e Termica presso l’Università di Pisa, discutendo la tesi “Sustainable design of ground-source heat pump systems: optimization of operative life performances”. Dal 2015 al 2017 è stato Assegnista di Ricerca e Borsista presso il DESTEC, Università di Pisa. Da aprile 2017 è Ricercatore a Tempo Determinato, sempre presso il DESTEC, ed è titolare del corso “Termoenergetica degli edifici” del Corso di Laurea in Ingegneria dell’Energia. La sua attività riguarda la progettazione e la gestione ottimizzata degli impianti geotermici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici. I suoi settori principali d’interesse professionale sono: gli impianti di climatizzazione ad acqua e ad aria, lo sviluppo di modelli al calcolatore per la simulazione e la valutazione delle prestazioni energetiche dei sistemi edificio – impianto, lo studio e sviluppo di metodologie per la diagnosi energetica negli edifici, l’individuazione di buone pratiche di progettazione e gestione dei sistemi edifici-impianto. Socio AiCARR, UGI, FTI e dell’American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Membro dell’International Geothermal Association (IGA) Resources & Reserves Committee e Co-chair del Subcommittee A per la promozione e l’aggiornamento delle specifiche riguardanti l’applicazione del protocollo UNFC alle applicazioni geotermiche (pompe di calore incluse).