



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione della prestazione e della gestione energetica di edifici residenziali pilota

A. Capozzoli, S. P. Corgnati, S. Brandi, D. M. Mazzarelli,
G. Vergerio, S. Viazzo

CARATTERIZZAZIONE DELLA PRESTAZIONE E DELLA GESTIONE ENERGETICA DI EDIFICI RESIDENZIALI PILOTA

A. Capozzoli, S. P. Corgnati, S. Brandi, D. M. Mazzarelli, G. Vergerio, S. Viazzo (Politecnico di Torino, Dipartimento Energia)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

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

Progetto: D.7 Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano

Obiettivo: b. Sistemi e servizi smart per edifici

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Individuazione di archetipi di edificio e analisi di scenari energetici."*

Responsabile scientifico ENEA: Sabrina Romano

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: A. Capozzoli, S.P. Corgnati.

Indice

1	INTRODUZIONE	4
2	DESCRIZIONE ATTIVITÀ E RISULTATI.....	5
2.1	CARATTERIZZAZIONE DELL'AMBIENTE INTERNO	5
2.2	CARATTERIZZAZIONE DEI CONSUMI DI CLIMATIZZAZIONE ESTIVA	13
2.2.1	<i>Caratterizzazione tramite statistica descrittiva</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Caratterizzazione con tecniche di Data Analytics</i>	<i>17</i>
2.3	SCENARI DI GESTIONE E AUTOMAZIONE ENERGETICA	20
2.3.1	<i>Caso di studio</i>	<i>20</i>
2.3.2	<i>Logiche di Controllo e Software IDA-ICE.....</i>	<i>21</i>
2.3.3	<i>Risultati</i>	<i>22</i>
2.3.4	<i>Giornata tipologica stagione di riscaldamento.....</i>	<i>23</i>
2.3.5	<i>Giornata tipologica stagione di raffrescamento.....</i>	<i>24</i>
3	CONCLUSIONI.....	26
4	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	27

1 Introduzione

Il presente studio si è focalizzato sull'applicazione di alcune tecniche di statistica descrittiva e di *Data analytics* sui dati raccolti in quattordici abitazioni pilota ubicate nel Comune di Roma (zona climatica D), con la finalità di caratterizzarne la qualità termica interna e il comportamento energetico. Inoltre, lo studio ha previsto analisi di simulazione energetica condotte su un edificio tipologico e rappresentativo degli edifici residenziali considerati, finalizzata a valutare l'impatto di diverse strategie di gestione e automazione sul fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento e la qualità dell'ambiente interno.

Tutte le abitazioni sono localizzate nel Comune di Roma: le prime quattro sono ubicate in zone Trionfale, Boccea-Casalotti e Mentana, e la sperimentazione su di esse risale già all'annualità 2016 [1]; le restanti dieci sono dislocate nei quartieri Prenestino-Centocelle, Alessandrino, Prenestino-Labicano e Don Bosco. Tutte le abitazioni sono state parte delle analisi condotte nel PAR dell'annualità 2017 [2], al quale si rimanda per ulteriori dettagli circa i casi studio e le tecniche applicate. Nel presente documento ci si riferirà ai due gruppi come "C2017" o "Aggregatore 1" (dieci abitazioni) ed "E2016" o "Aggregatore 2" (quattro abitazioni).

Lo studio ha previsto in prima battuta la verifica della continuità di acquisizione del sistema di monitoraggio presente nei quattordici casi pilota e della significatività dei dati acquisiti. Le analisi condotte sono state differenziate, in accordo alle caratteristiche delle abitazioni (es. presenza/assenza di climatizzazione estiva) e alla disponibilità di dati in termini di copertura, significatività e periodo di monitoraggio. Ulteriori dettagli sono riferiti nella sezione 2, strutturata secondo le tre tematiche di: caratterizzazione dell'ambiente interno (sezione 2.1), caratterizzazione dei consumi di climatizzazione estiva (sezione 2.2) e strategie di gestione energetica (sezione 2.3).

2 Descrizione attività e risultati

2.1 Caratterizzazione dell'ambiente interno

L'analisi condotta ha interessato i dati di monitoraggio (corrispondente al periodo settembre-novembre 2018) delle temperature interne delle quattordici abitazioni pilota E2016 e C2017, con l'obiettivo di caratterizzarne il comportamento in termini di qualità termica raggiunta. La non completa copertura del *dataset* ha reso necessario escludere dalle analisi cinque abitazioni. Il *dataset* delle restanti (E4, E8, E9, C4, C5, C7, C8, C9) è stato ripartito in due periodi: pre-riscaldamento (corrispondente a settembre e ottobre) e riscaldamento (novembre), per i quali sono state calcolate, per ciascun ambiente monitorato:

- Le temperature interne medie orarie;
- Le percentuali di ore trascorse entro le diverse classi di comfort da UNI EN 15251 [3] sul totale delle ore monitorate. Le classi di comfort in questo studio corrispondono alle seguenti soglie:

T_Inverno:

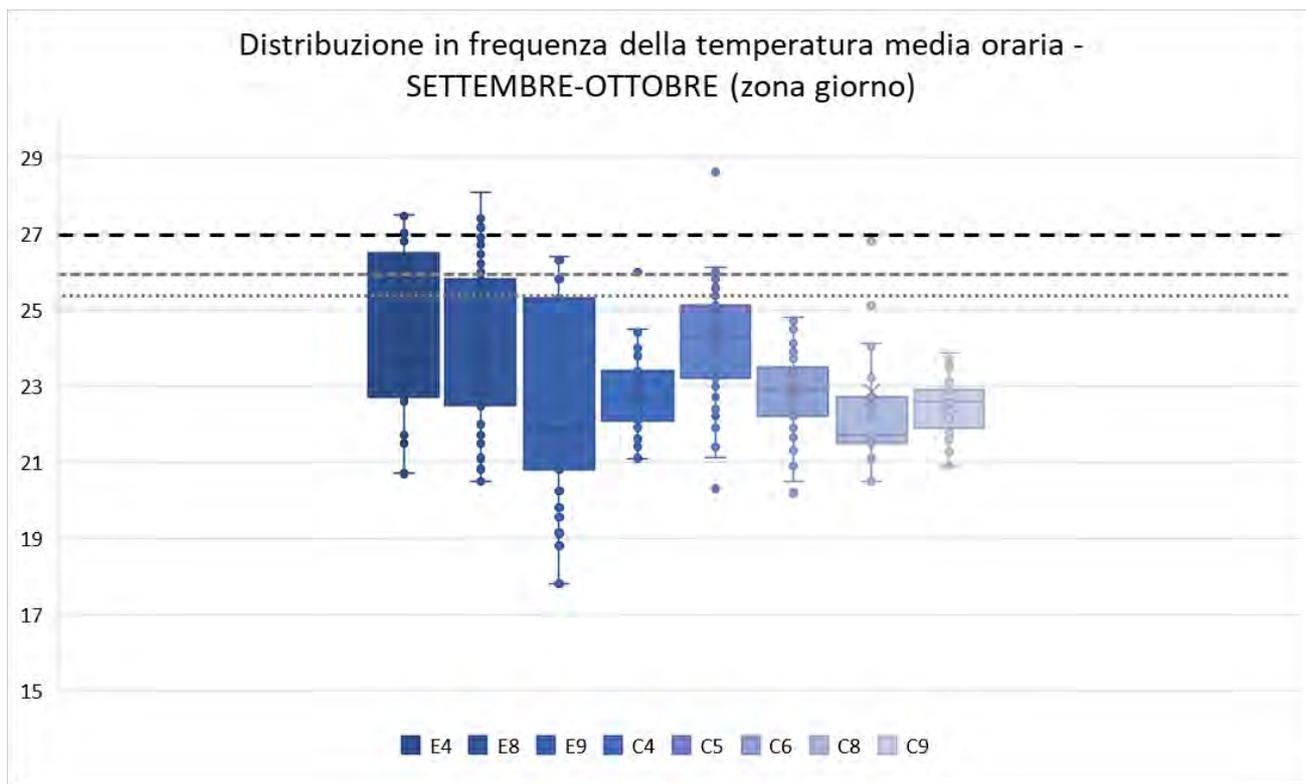
- **Classe I** $\geq 21^{\circ}\text{C}$
- **Classe II** $\geq 20^{\circ}\text{C}$
- **Classe III** $\geq 18^{\circ}\text{C}$
- **Classe IV** $< 18^{\circ}\text{C}$ (*discomfort*)

T_Estate:

- **Classe I** $\leq 25,5^{\circ}\text{C}$
- **Classe II** $\leq 26^{\circ}\text{C}$
- **Classe III** $\leq 27^{\circ}\text{C}$
- **Classe IV** $> 27^{\circ}\text{C}$ (*discomfort*)

Per favorire il confronto tra abitazioni, le temperature interne medie orarie sono state rappresentate in termini di distribuzione in frequenza in un determinato ambiente e per i due periodi monitorati (settembre-ottobre e novembre). L'ambiente è stato scelto in base alla comunanza di destinazione d'uso tra i diversi casi pilota. Le percentuali di ore entro le diverse classi di comfort sono plottate secondo la stessa logica.

Di seguito si riportano i grafici per i due periodi monitorati. Mentre per il periodo settembre-ottobre si è scelto di rappresentare il parametro ambientale di temperatura interna media oraria per la zona giorno, del mese di novembre sono stati realizzati gli stessi grafici sia per la zona giorno che per la zona notte, in modo da discutere la differenza nelle preferenze termiche degli occupanti tra due diversi usi degli ambienti. Nei grafici seguenti il pedice "n" rappresenta il numero di record sulla base dei quali è stata condotta l'analisi di distribuzione in frequenza attraverso la rappresentazione box-plot.



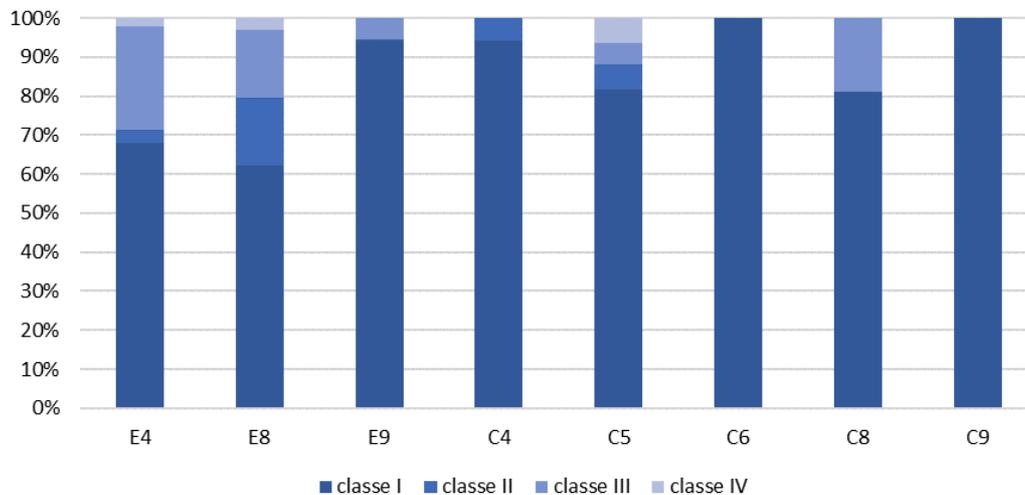
..... classe I - - - - - classe II - - classe III

n(E4) = 1397; n(E8) = 960; n(E9) = 1236; n(C4) = 275; n(C5) = 585; n(C6) = 482; n(C8) = 286; n(C9) = 418

Figura 1 Periodo estivo (zona giorno)_Distribuzione in frequenza del dato di temperatura interna media oraria e soglie delle classi di comfort termico per la stagione di raffrescamento.

Come si può osservare in Figura 1, le abitazioni E2016 (“Aggregatore 2”) hanno una maggiore variabilità nel dato di temperatura interna media oraria rispetto a C2017 (“Aggregatore 1”), con il terzo quartile più alto per E4, la cui zona giorno è esposta ed est, contro quelle di E8 ed E9 che sono esposte a nord. La distribuzione più sparsa dei dati relativi a E2016 è però influenzata dal fatto che sia incluso il mese di settembre, la cui copertura non era garantita dai *dataset* delle abitazioni di C2017. La classe di comfort I, corrispondente a temperature inferiori a 25,5°C, è raggiunta in tutte le abitazioni C2018 nell’80% dei casi nel periodo considerato (Figura 2), quando la media mensile delle temperature esterne è stata di circa 21°C.

Distribuzione temperature medie orarie nelle classi di comfort - SETTEMBRE-OTTOBRE (zona giorno)

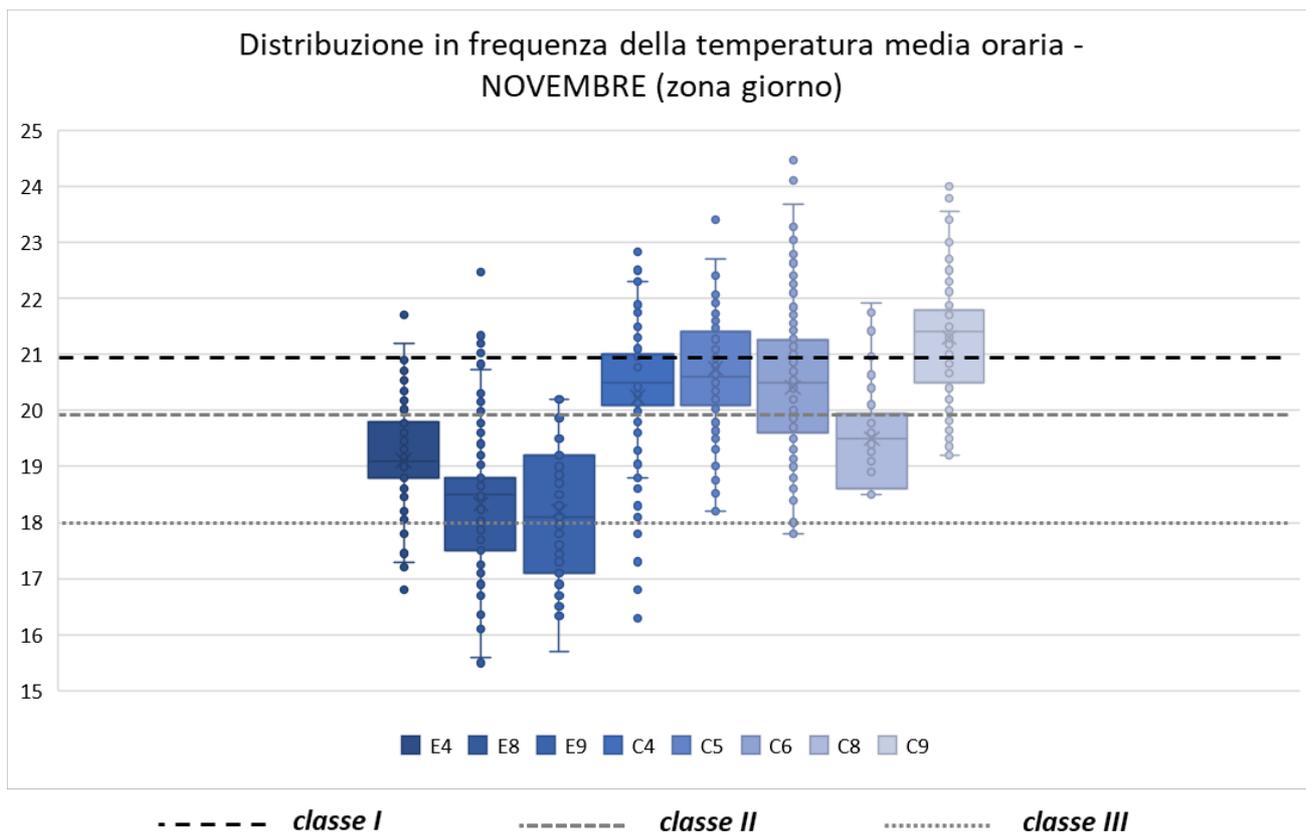


$n(E4) = 1397$; $n(E8) = 960$; $n(E9) = 1236$; $n(C4) = 275$; $n(C5) = 585$; $n(C6) = 482$; $n(C8) = 286$; $n(C9) = 418$

Figura 2 Periodo estivo (zona giorno)_Percentuale di ore sulla totalità delle ore monitorate (n) nelle quali il dato di temperatura interna media giornaliera entra nei limiti delle classi di comfort termico.

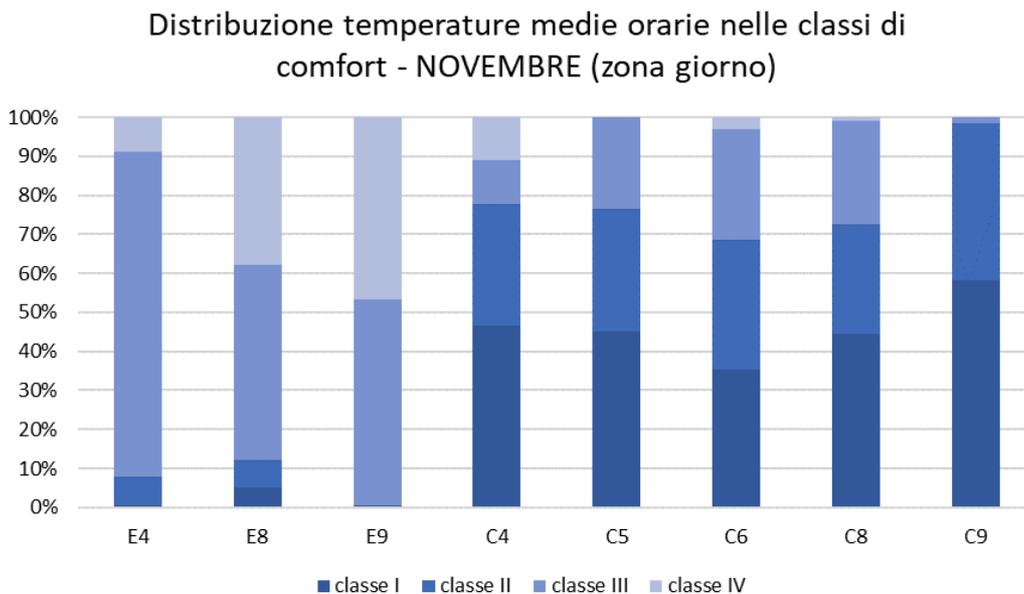
Dal grafico sottostante (Figura 3) è possibile osservare come le abitazioni della sperimentazione E2018 ("Aggregatore 2") siano caratterizzate da temperature interne medie orarie mediamente più basse rispetto alle abitazioni C2017 ("Aggregatore 1"). Sono le stesse tre infatti che si trovano più spesso delle altre in classi di comfort III o IV (dove la classe IV è definita come di discomfort, corrispondendo a temperature inferiori ai 18°C in inverno), come si osserva in Figura 4. In particolare, l'abitazione E9 non è mai in classe di comfort I, avendo temperature sempre inferiori ai 21°C, e in quasi il 50% dei casi si trova in condizioni di discomfort. L'abitazione C9 è quella caratterizzata dal maggior numero di ore in classe di comfort I e II, e come evidenziato in PAR17 [2], è caratterizzata da un alto consumo termico specifico.

Entrambe le abitazioni C4 e C5 sono appartamenti in edifici multifamiliari risalenti alla metà del secolo scorso, e risultano paragonabili in termini di comfort termico raggiunto. Tuttavia, nell'abitazione C4 talvolta sono state riscontrate condizioni di discomfort (classe IV): essendo occupata da un lavoratore pendolare, probabilmente questo dato dimostra il funzionamento meno frequente e più intermittente dell'impianto di riscaldamento. Per l'appartamento C6 si evidenziano margini di miglioramento relativamente alla gestione dell'impianto di riscaldamento: pur trattandosi di un edificio nuovo, il dato di temperatura medio orario è poco stabile e i consumi termici piuttosto elevati, con una percentuale di ore in classe di comfort inferiore al 40%, nonostante l'abitazione sia occupata per buona parte della giornata.



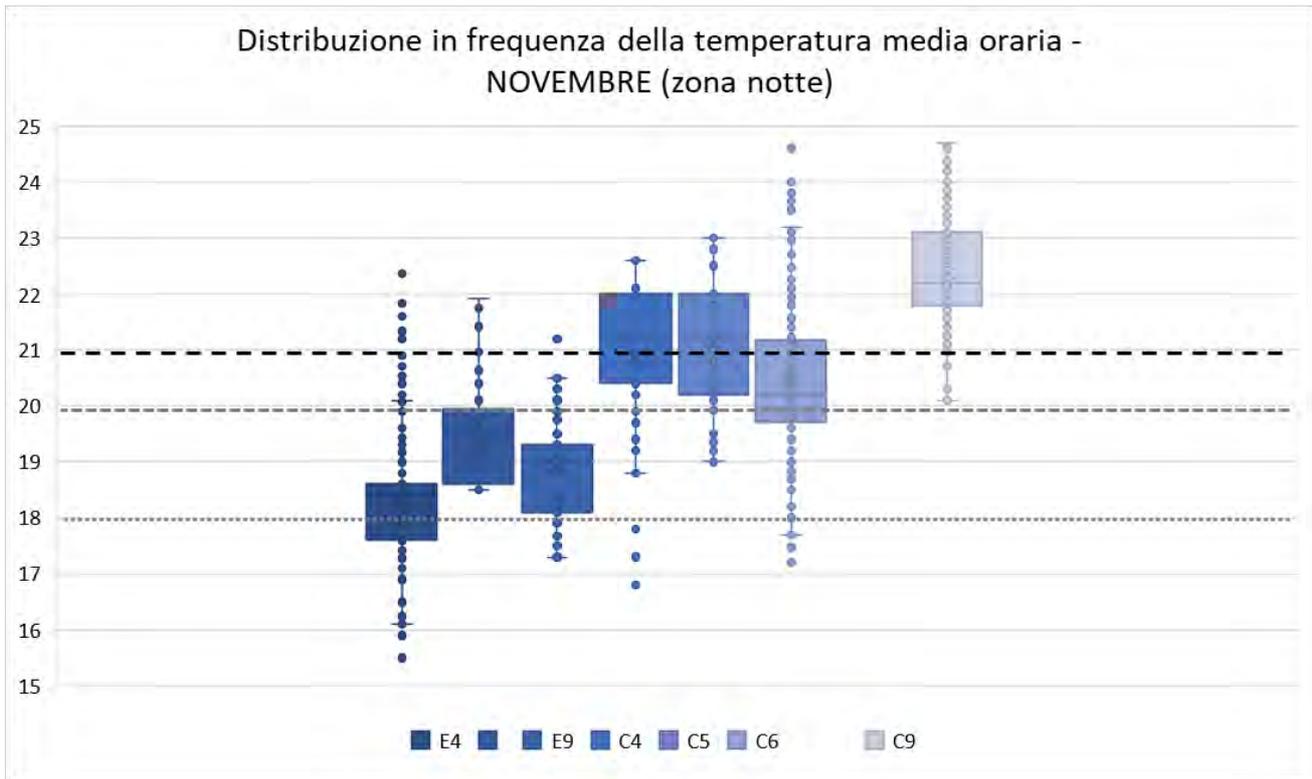
n(E4) = 699; n(E8) = 180; n(E9) = 688; n(C4) = 636; n(C5) = 652; n(C6) = 614; n(C8) = 74; n(C9) = 680

Figura 3 Periodo invernale (zona giorno)_Distribuzione in frequenza della temperatura interna media oraria e soglie delle classi di comfort termico per la stagione di riscaldamento.



n(E4) = 699; n(E8) = 180; n(E9) = 688; n(C4) = 636; n(C5) = 652; n(C6) = 614; n(C8) = 74; n(C9) = 680

Figura 4 Periodo invernale (zona giorno)_Percentuale di ore sulla totalità delle ore monitorate (n) nelle quali il dato di temperatura interna media giornaliera entra nei limiti delle classi di comfort termico.

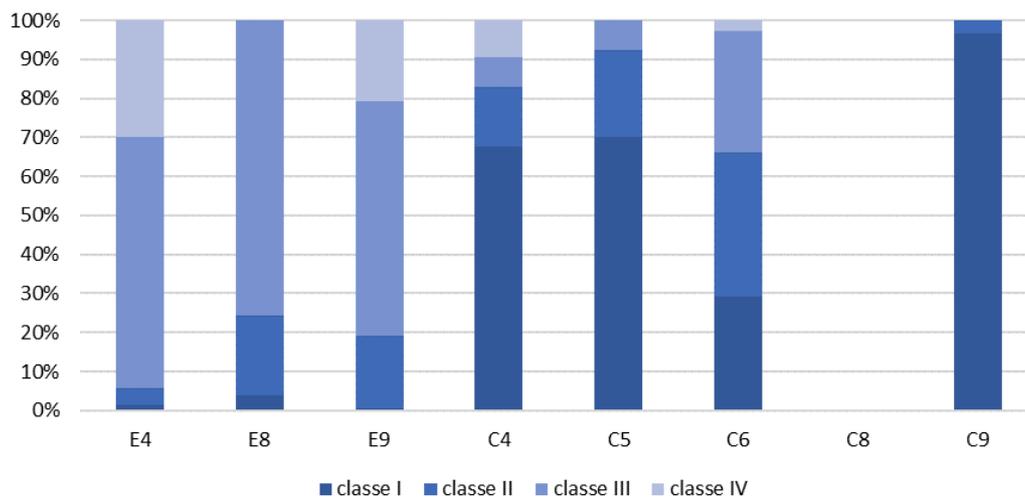


- - - - - classe I - - - - - classe II classe III

$n(E4) = 702$; $n(E8) = 74$; $n(E9) = 702$; $n(C4) = 641$; $n(C5) = 679$; $n(C6) = 625$; $n(C8) = 0$; $n(C9) = 638$

Figura 5 Periodo invernale (zona notte)_Distribuzione in frequenza del dato di temperatura interna media oraria e soglie delle classi di comfort termico per la stagione di riscaldamento.

Distribuzione temperature medie orarie nelle classi di comfort - NOVEMBRE (zona notte)



$n(E4) = 702$; $n(E8) = 74$; $n(E9) = 702$; $n(C4) = 641$; $n(C5) = 679$; $n(C6) = 625$; $n(C8) = 0$; $n(C9) = 638$

Figura 6 Periodo invernale (zona notte)_Percentuale di ore sulla totalità delle ore monitorate (n) nelle quali il dato di temperatura interna media giornaliera entra nei limiti delle classi di comfort termico.

Come è possibile osservare dal confronto tra Figura 3 e Figura 5, quasi tutti gli occupanti preferiscono mantenere delle temperature mediamente più alte nella zona notte, piuttosto che nel soggiorno. Fanno

eccezione E4 e, anche se in modo molto meno marcato, C6. Ne risulta che questi ultimi siano gli unici casi in cui la distribuzione delle ore nelle classi di comfort del dato di temperatura medio orario per la zona notte (Figura 6) sia meno favorevole che nella zona giorno (Figura 4). L'abitazione C8 è stata esclusa dai grafici prodotti relativamente al comportamento termico della zona notte a causa della mancanza di dati. Come già evidenziato a commento dei grafici relativi alla zona giorno, anche per quanto riguarda la zona notte è l'abitazione C9 quella caratterizzata dalle temperature mediamente più alte. Questo le garantisce di mantenersi quasi nel 100% dei casi in classe di comfort termico I (Figura 6), con un relativo impatto sulla bolletta energetica. In quattro abitazioni su sette alcune ore ricadono entro la classe di discomfort, avendo una temperatura interna media oraria inferiore a 18°C. Una di queste è l'abitazione C6 che dunque evidenzia, anche per la zona notte, margini di miglioramento nel controllo delle condizioni dell'ambiente interno. Al contrario, l'occorrenza di condizioni di discomfort nell'abitazione C4 è da interpretare come derivante da una condizione di sua minore occupazione. L'impiego meno frequente dell'impianto di riscaldamento, che in C4 è centralizzato, fa sì che sia questa abitazione ad avere la bolletta relativa all'energia termica più bassa (infatti C5 consuma meno gas al metro quadrato di C4, ma senza includere la produzione di acqua calda sanitaria, che è elettrica).

Per meglio comprendere la capacità dei generatori di calore di soddisfare i requisiti ambientali scelti dagli occupanti tramite l'impostazione della temperatura di set-point, e degli ambienti di mantenerli, è stata analizzata anche la distribuzione in frequenza delle differenze tra la temperatura interna media oraria e il set-point medio orario. L'analisi è stata condotta sulla zona giorno, ma per le sole abitazioni C4, C6, C8 e C9. Infatti, i dati di set-point sono risultati assenti in E4 e C5 e fissi in E8 ed E9. Nei restanti casi (C4, C6, C8 e C9) è stata calcolata la differenza tra temperatura interna e temperatura di set-point su base oraria, escluse le ore nelle quali fosse assente uno dei due dati o il secondo risultasse inferiore a 18°C (set-point inferiori a 18°C sono stati infatti considerati degli *outlier*). I risultati sono rappresentati in Figura 7 e discussi di seguito.

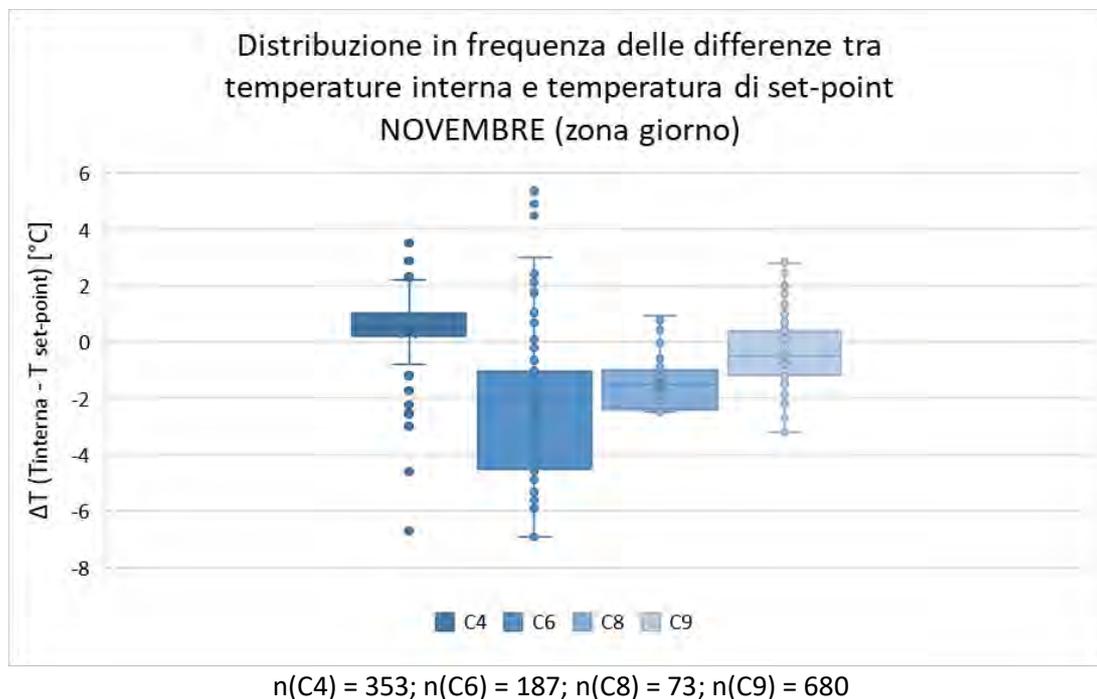


Figura 7 Periodo invernale (zona giorno)_Distribuzione in frequenza delle differenze medie orarie tra temperatura interna e temperatura di set-point.

Nel grafico sopra riportato, lo zero rappresenta l'aderenza tra la temperatura di set-point scelta e quella garantita dall'impianto di riscaldamento e dall'ambiente. Come è possibile osservare in Figura 7, le abitazioni C4 e C9 sono quelle caratterizzate da un valore di mediana più vicino allo zero. Si tratta di due abitazioni costruite negli anni 1946-1961, caratterizzate probabilmente da una maggiore inerzia termica dei componenti dell'involucro edilizio, in grado dunque di mantenere le condizioni interne più stabili. La maggior

variabilità del dato ΔT per C4 è ancora da ricondursi ad un uso più intermittente dell'impianto, condizione che può far sì che occorranò delle finestre temporali nelle quali il generatore non è ancora stato in grado di portare in temperatura l'ambiente dopo il periodo di spegnimento. Al contrario, in C9 è più raro ottenere valori negativi di ΔT , quindi meno frequentemente la temperatura interna è più bassa rispetto a quella di set-point. Infatti, valori negativi di ΔT rappresentano una condizione per cui la temperatura di set-point non è stata raggiunta in ambiente. Al contrario, per valori positivi la temperatura media interna ha superato il set-point. In questa condizione, la presenza della smart valve dovrebbe aver comportato la chiusura delle valvole dei radiatori. Tuttavia, dalla lettura dei dati emerge che, specialmente in C6, la temperatura interna media ha continuato a salire. Questo dato conferma ulteriormente l'esistenza di margini di miglioramento nella gestione energetica di C6 che, essendo un edificio nuovo (2010-2015) e quindi probabilmente molto più coibentato degli altri, potrebbe garantire condizioni termiche adeguate anche con una programmazione delle accensioni dell'impianto differente, tale da prevenire il surriscaldamento.

Infatti, secondo la definizione di comfort termico fino a qui impiegata, temperature interne superiori ai 21°C corrisponderebbero ad un maggior soddisfacimento dell'occupante. Tuttavia, alcune delle abitazioni caratterizzate dal maggior numero di ore in classe di comfort I, raggiungono talvolta delle temperature interne medie orarie anche di 23-24°C, in particolare le abitazioni C5, C6 e C9. Secondo alcuni studi, temperature troppe elevate in ambiente possono provocare una risposta negativa dell'organismo [4], dunque una loro riduzione potrebbe provocare un maggior benessere dell'occupante, insieme ad un risparmio energetico. Tuttavia, raramente gli occupanti risultano consapevoli degli effetti che le loro azioni sul sistema comportano in termini di consumi energetici, qualità dall'ambiente interno e salute. Per questo l'informazione all'occupante finalizzata ad una gestione dell'abitazione coerente rispetto agli obiettivi sia di benessere in ambiente che di efficienza energetica è da ritenersi molto importante.

Al fine di interpretare gli effetti del comportamento dell'occupante (in termini di impostazione della temperatura di set-point) sulle condizioni termiche dell'ambiente interno, una rappresentazione più appropriata richiede di plottare gli andamenti dei dati di temperatura interna e di set-point nel tempo.

Dal momento che la buona copertura del *dataset* non è sempre accompagnata da un altrettanto buona significatività (es. dati costanti per lunghi periodi, probabilmente a causa di malfunzionamento delle sonde), gli andamenti delle temperature interne medie orarie sono stati rappresentati insieme al dato di temperatura esterna e di set-point solamente per giornate tipo. Di seguito si riporta il caso di una giornata invernale riferita alla zona giorno dell'abitazione C4 e quello di una giornata invernale per la zona giorno dell'abitazione C6. La seconda è stata scelta per via della già nominata potenzialità di miglioramento nella gestione energetica della stessa, mentre l'abitazione C4 è interessante per il fatto che è l'unica a non avere un impianto autonomo.

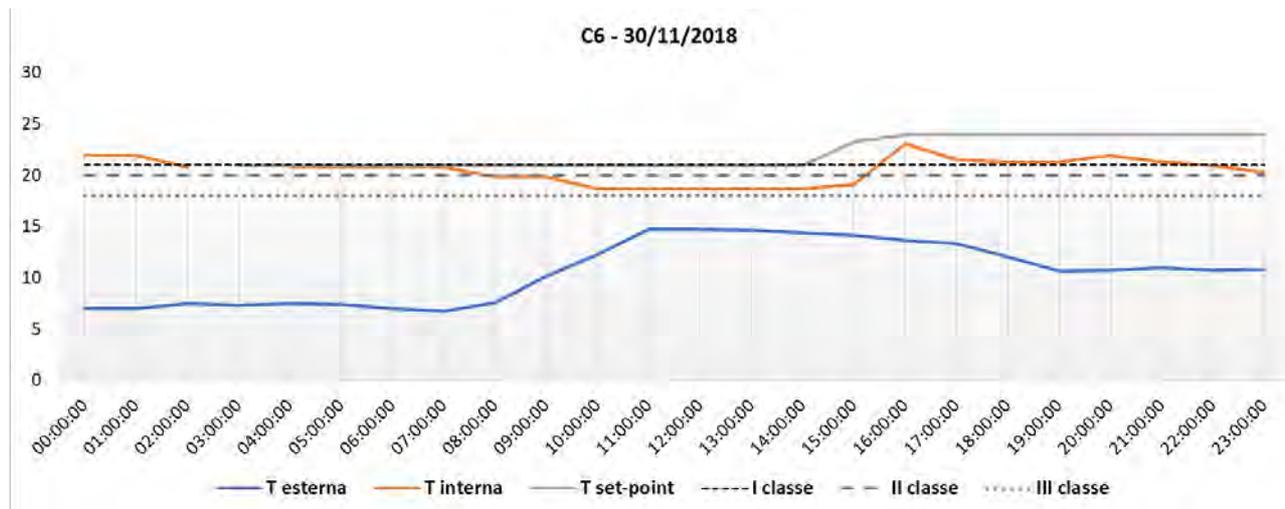


Figura 8 Periodo invernale (zona giorno)_Andamento di temperature medie orarie esterna (blu) interna (arancione) e di set-point (grigia) a confronto con le soglie caratterizzanti le classi di comfort da UNI EN 15251.

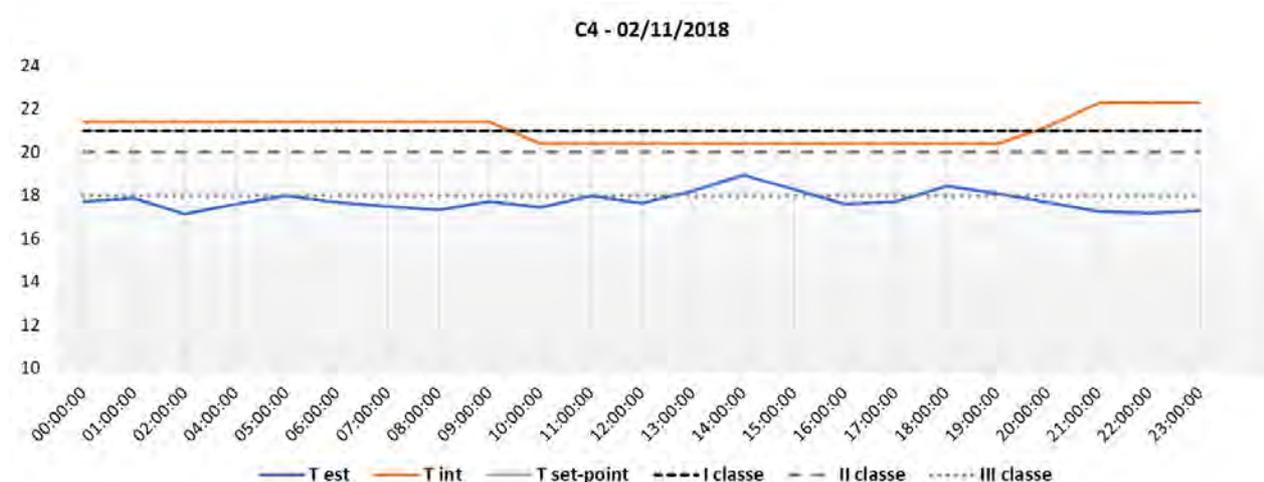


Figura 9 Periodo invernale (zona giorno)_Andamento di temperature medie orarie esterna (blu) interna (arancione) e di set-point (grigia) a confronto con le soglie caratterizzanti le classi di comfort da UNI EN 15251.

In Figura 8, relativamente all’abitazione C6, è possibile osservare come la temperatura interna media oraria scenda nelle prime ore della notte per mantenersi costante fino alle prime ore della mattina. Nell’arco della mattinata scende, mantenendosi comunque entro la soglia della classe di comfort III (cioè sopra i 18 °C). In corrispondenza del calo della temperatura esterna media oraria, gli occupanti, sempre in casa nell’arco della giornata, intervengono sul set-point programmato, innalzandolo.

Invece, in Figura 9 è possibile osservare come l’occupante abbia scelto di mantenere una temperatura di set-point coincidente con la soglia di classe di comfort I, cioè 21°C. Tuttavia, a partire dalle 9:00, si osserva che la temperatura interna scende, per poi risalire la sera. Questo caso evidenzia come nel tipo di analisi qui condotte sia essenziale la conoscenza del caso studio per poter spiegare alcuni comportamenti del sistema edificio-impianto-occupante. Infatti, questo andamento è da leggere in relazione allo stato di occupazione e alla tipologia di impianto presente: C4 è inoccupata durante il giorno e il suo impianto è centralizzato. Dunque, nonostante il set-point sia fisso, l’impianto deve essersi spento secondo l’orario di accensione imposto a livello condominiale. L’ambiente, costruito nell’epoca 1946-1961 e inoccupato (quindi chiuso), ha mantenuto le condizioni ambientali entro la classe di comfort II.

In ultima analisi, per le due abitazioni appena discusse (C4 e C6), è stata misurata la correlazione esistente tra la differenza tra temperature interne e di set-point medie orarie e la temperatura esterna (tutte e tre le grandezze in gioco sono plottate in Figura 8 e Figura 9 per due giorni tipo). La bassa correlazione conferma i risultati ottenuti tramite le altre analisi: C6 evidenzia margini di miglioramento nella gestione energetica,

potenzialmente ottenibile adottando un approccio adattivo. Allo stesso tempo il risultato si spiega con l'alto grado di coibentazione di questa abitazione di recente costruzione. La bassa correlazione evidenziata in C4 (0,26) è da interpretarsi piuttosto come conseguenza di una occupazione dell'abitazione meno frequente. In particolare, la scarsa correlazione tra gli andamenti delle temperature interne e quelle esterne non dipende da una scelta dell'occupante ma piuttosto dal fatto che l'occupante non è in casa, dunque non ha esigenze di mantenere la propria abitazione in temperatura nell'arco della giornata.

2.2 Caratterizzazione dei consumi di climatizzazione estiva

2.2.1 Caratterizzazione tramite statistica descrittiva

Il monitoraggio di lungo periodo condotto sugli edifici dell'aggregatore 1 comprende dati relativi al consumo elettrico dei condizionatori presenti, in particolare è stato possibile analizzare i dati relativi all'intera stagione di raffrescamento 2018, poiché il monitoraggio è stato condotto in un periodo più esteso, cioè dal mese di aprile al mese di novembre. In questo modo, è stato possibile caratterizzare in modo più robusto il comportamento degli utenti e i consumi relativi agli apparecchi di raffrescamento, discutendo i risultati in un'ottica di generalizzazione.

I dati dell'aggregatore 1 si riferiscono a 10 edifici (i.e. da C1 a C10), però solamente 2 edifici di questi (i.e. C7 e C9) sono stati analizzati per questo report, poiché negli altri edifici gli impianti di condizionamento dell'aria non sono stati utilizzati nel mese di settembre il quale rappresenta il periodo di monitoraggio che non è stato analizzato nel report PAR 2017 [2].

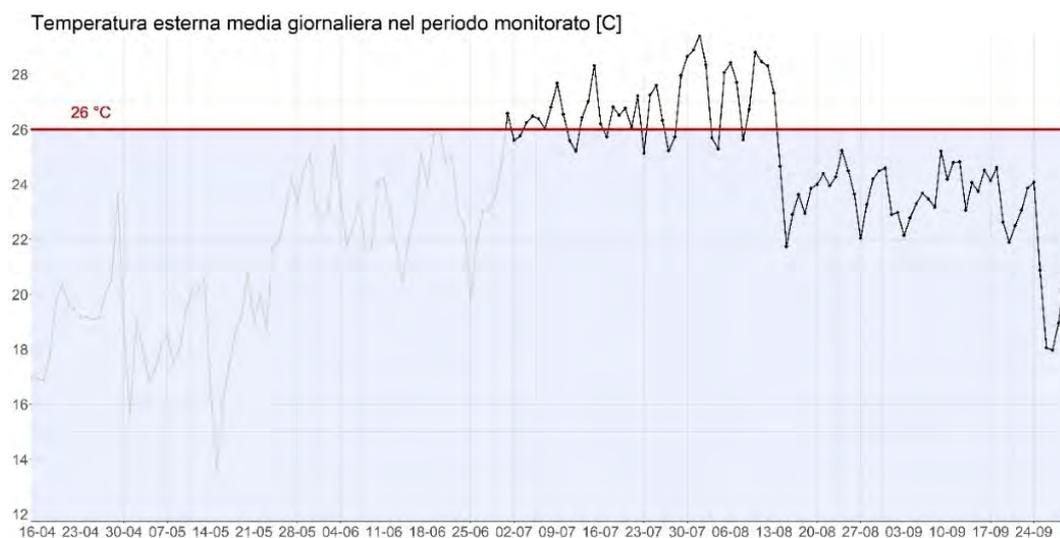


Figura 10 Andamento della temperatura esterna nel periodo di monitoraggio

L'assenza di dati di assorbimento elettrico dei condizionatori negli altri edifici è spiegabile guardando l'andamento delle temperature esterne (Figura 10), ottenute dal database di wunderground.com [5], le quali non risultano molto alte nel mese di settembre. In particolare, come si può vedere anche dalla Figura 11, le giornate in cui la temperatura media giornaliera dell'aria esterna ha raggiunto valori superiori a 26 °C, considerabile come set-point interno, risultano assenti nel mese di settembre. Dunque, l'utilizzo dei condizionatori negli edifici analizzati può essere legato alla presenza di temperature interne più alte a causa di apporti solari e interni più alti nei casi specifici, oppure dalla preferenza di un set-point particolarmente basso.

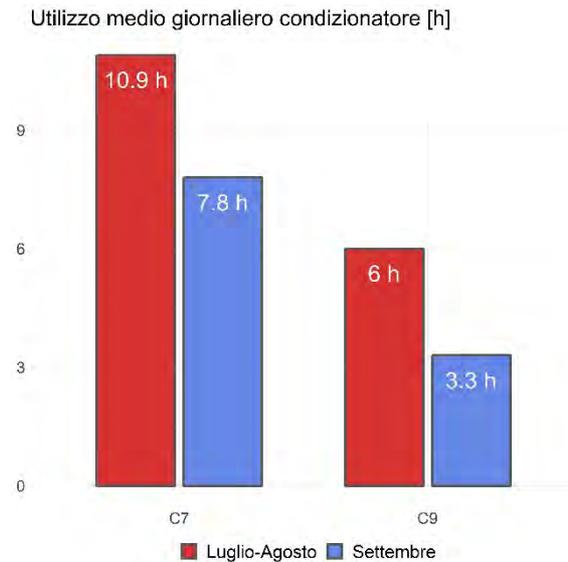


Figura 13 Confronto delle ore medie di funzionamento dei condizionatori per il periodo Luglio-Agosto e il mese di Settembre

Inoltre, è stato effettuato un confronto sull'utilizzo dei condizionatori nel mese di settembre e nei mesi precedenti, i quali sono stati già analizzati nel report del PAR 2017, rappresentando le distribuzioni dei consumi tra le 3 fasce orarie in Figura 14 e la distribuzione dei consumi dell'edificio per utenza in Figura 15, riportando all'interno del diagramma a torta i dati relativi al periodo Luglio-Agosto, mentre all'esterno quelli del mese di settembre.



Figura 14 Distribuzione dei consumi tra le fasce orarie per il periodo luglio-agosto (interno) e settembre (esterno)

Le abitudini di utilizzo dei condizionatori risultano molto diverse per i diversi periodi considerati, poiché per C7 se nei mesi precedenti i consumi erano distribuiti più o meno equamente tra F2 e F3, nel mese di Settembre la quota relativa alla fascia F1 non risulta più trascurabile. Per quanto riguarda invece C9, una prevalenza di utilizzo non molto marcata in F1 dei mesi precedenti, diventa una predominanza assoluta nel mese di settembre. Una possibile spiegazione potrebbe essere legata non tanto alla modifica dell'ora di utilizzo dell'edificio tra i mesi di Luglio-Agosto e il mese di Settembre, ma a una preferenza di utilizzo dei

condizionatori nei casi in cui la radiazione solare è più intensa, dunque nelle ore centrali della giornata (i.e. F1).

In Figura 15 sono stati rappresentate le utenze in modo tale da distinguere i consumi relativi ai condizionatori presenti, le utenze monitorate e gli altri consumi elettrici legati a dispositivi non disaggregati. Per questi 2 edifici i consumi non disaggregati non includono condizionatori che non sono stati monitorati separatamente, poiché per C7 l'unico condizionatore presente è monitorato tramite smart switch, mentre per C9 i 2 condizionatori presenti sono monitorati tramite un unico smart switch installato sulla loro linea comune. Dalla Figura 15 si può notare, invece, come i consumi di C9 hanno mantenuto una distribuzione simile per utilizzo, mentre per quanto riguarda C7 l'abbassamento più evidente dei consumi dei condizionatori ha fatto aumentare il peso relativo delle altre utenze sulla distribuzione dei consumi.



Figura 15 Distribuzione dei consumi per utenza per il periodo luglio-agosto (interno) e settembre (esterno)

In Figura 16 sono riportati i consumi giornalieri dei condizionatori per l'edificio C7, mentre in Figura 17 quelli per l'edificio C9, mettendo in evidenza il periodo che non è stato analizzato per il report PAR 2017.

C7: Consumo giornaliero condizionatore[Wh]

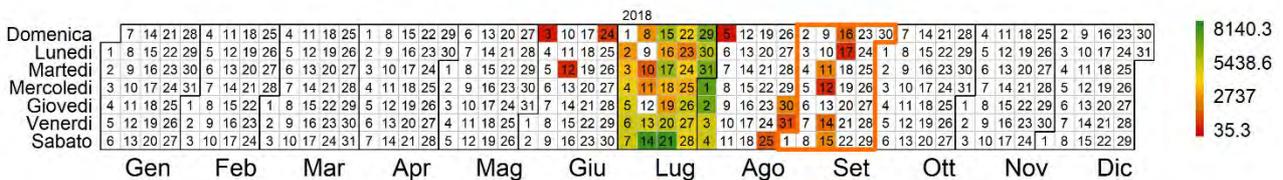


Figura 16 Calendar plot dei consumi elettrici giornalieri dei condizionatori di C7

In particolare, dai Calendar plot dei consumi dei condizionatori si può notare come il numero delle giornate di consumo è di minore intensità rispetto a quelle del periodo precedentemente analizzato.

C9: Consumo giornaliero condizionatore[Wh]

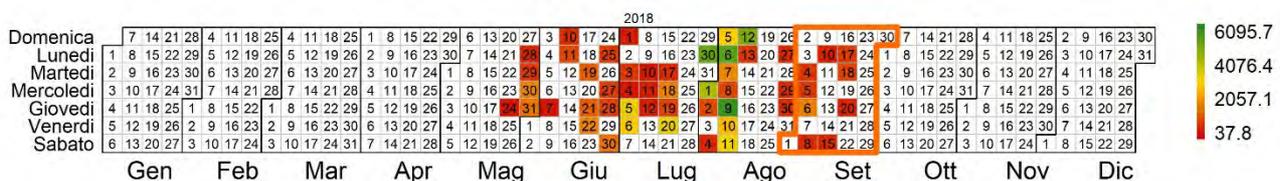


Figura 17 Calendar plot dei consumi elettrici giornalieri dei condizionatori di C9

2.2.2 Caratterizzazione con tecniche di *Data Analytics*

Per effettuare una caratterizzazione dei consumi, oltre alla statistica descrittiva, sono state sfruttate tecniche di *Data Analytics*, le quali sono state già utilizzate per la metodologia sviluppata per il report PAR 2017 [2]. Per prima cosa i dati sono stati oggetto di *pre-processing*, in particolar modo perché i dati forniti avevano una risoluzione quart'oraria, la quale rappresentava una scala di dettaglio troppo elevata per le analisi da condurre, considerando che i profili di assorbimento elettrico nel caso di residenziale presentano tipicamente andamenti impulsivi, quindi con assorbimenti elevati di breve durata. Per poter confrontare queste variabili con altre che non presentano lo stesso tipo di andamento se pur da loro influenzate, i dati sono stati aggregati dapprima a valori medi orari e poi utilizzati per calcolare i valori di energia consumata all'interno di intervalli di tempo pari alle fasce orarie normalmente considerate dal provider dell'energia elettrica.

La trasformazione del dato da potenza assorbita a energia consumata in un intervallo di tempo determinato, ha permesso di superare i problemi generati dalla forma impulsiva del profilo di assorbimento elettrico, ottenendo dei dati significativi per il confronto con altre variabili energetiche e non.

Per la caratterizzazione, i consumi nelle fasce orarie sono stati discretizzati per permettere una più facile interpretazione dei risultati ottenuti, quindi è stato usato un algoritmo di clusterizzazione monodimensionale ottimizzato per ottenere intervalli di valori più appropriati per le variabili di consumo globale e dei condizionatori.

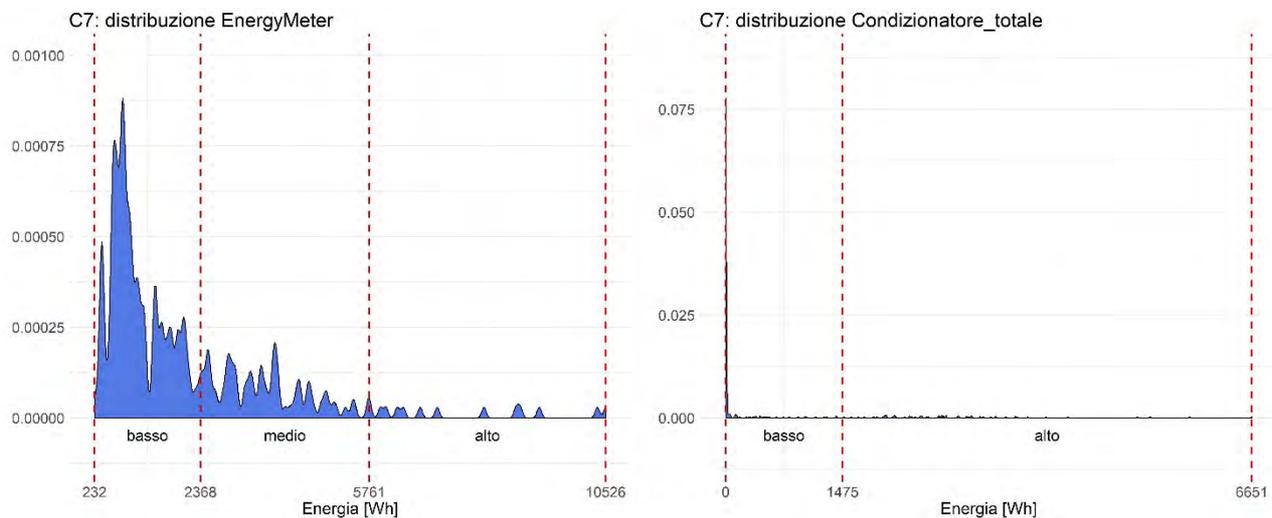


Figura 18 Discretizzazione dei consumi elettrici globali e dei condizionatori di C7

Gli intervalli di discretizzazione utilizzati sono stati calcolati indipendentemente per ogni edificio analizzato, in modo da ottenere intervalli che si adattano alla variabile a cui si riferiscono. In Figura 18 e Figura 19 sono rappresentate le distribuzioni con gli intervalli utilizzati per la discretizzazione sia per i consumi globali che quelli dei soli condizionatori, rispettivamente per C7 e C9. Gli intervalli si adattano non solo all'ampiezza diversa della scala dei valori presenti, ma anche alla densità locale dei punti, in modo da trovare la posizione dei *breakpoints* che riesce a generare intervalli il più coerenti possibili.

La discretizzazione è stata effettuata per step successivi, infatti in primo luogo è stata utilizzato un algoritmo gerarchico Ward, ottimizzando il numero di intervalli da trovare usando l'indice di Davies-Bouldin come metrica per identificare il miglior numero di split da effettuare, permettendo una escursione del numero di intervalli possibili da 2 a 4 [6]. La posizione dei *breakpoints* trovati è stata usata come inizializzazione per l'algoritmo aSAX che ottimizza la loro posizione in modo da minimizzare lo stesso parametro considerato dal Ward (i.e. SSE), posizionando i *breakpoints* in zone vicine a minore densità di punti per evitare di separare valori vicini e ad alta frequenza [7].

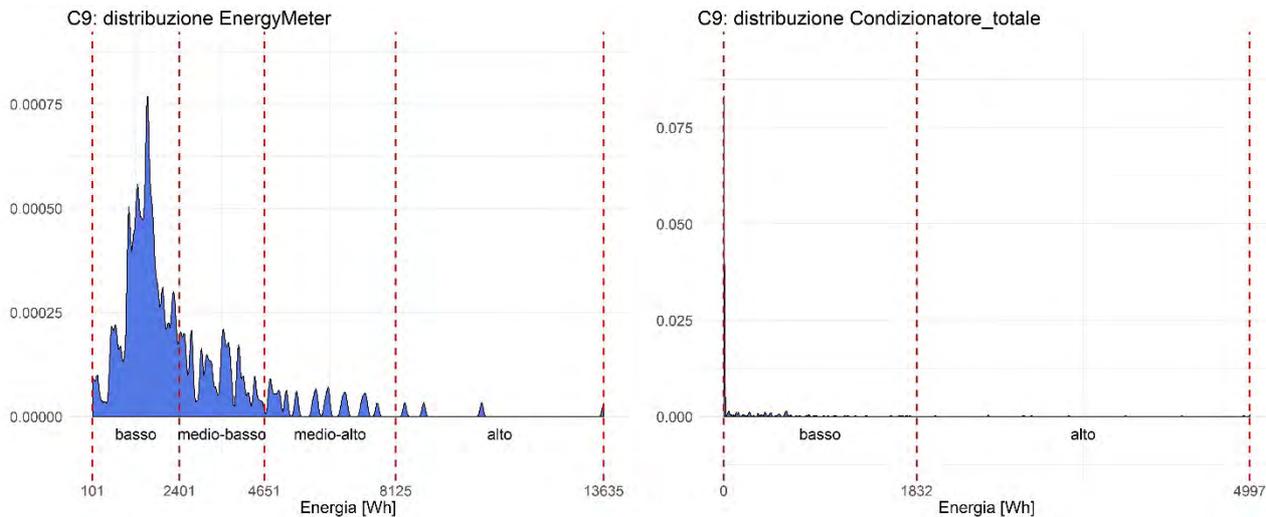


Figura 19 Discretizzazione dei consumi elettrici globali e dei condizionatori di C9

Il processo di discretizzazione, è stato condotto in maniera automatica, limitando l'arbitrarietà dell'intervento dell'esperto, permettendo solamente l'introduzione di un livello di consumo aggiuntivo che si riferisce alla condizione in cui i condizionatori sono spenti, fissando da esperto questa condizione fino a un valore di consumo pari a 20 Wh.

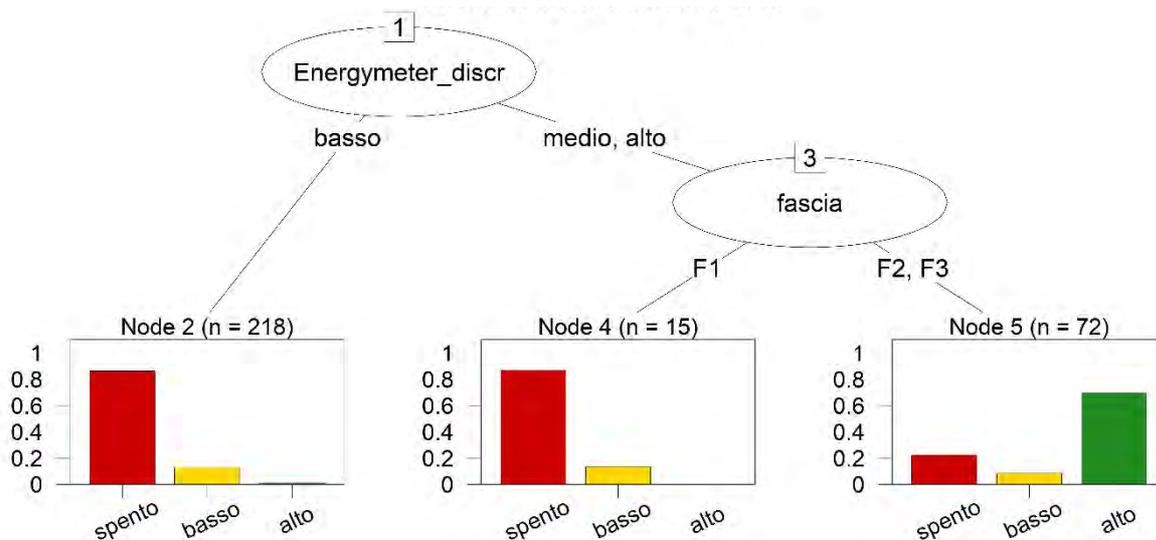


Figura 20 Albero di classificazione per la caratterizzazione dei consumi elettrici al m² dei condizionatori di C7

La caratterizzazione dei livelli di consumo elettrico dei condizionatori è stata effettuata tramite la costruzione di un albero di classificazione CART per ogni edificio, utilizzando come variabili predittive la temperatura esterna, il giorno della settimana, la fascia oraria e il livello di consumo elettrico globale e come variabile predetta il livello di consumo al m² dei condizionatori.

La metodologia è stata applicata ai soli edifici che presentano valori di assorbimento dei condizionatori nel mese di settembre, quindi sono stati analizzati solo gli edifici C7 e C9, mentre gli altri non presentano dati che non sono stati già caratterizzati nel report del PAR 2017 [2].

In Figura 20 è rappresentato l'albero di classificazione costruito per l'edificio C7, il quale riesce a classificare i 3 livelli di consumo al m² commettendo un errore del 18%, utilizzando i livelli di consumo globali e la fascia oraria per effettuare la classificazione.

In Figura 21 è stato raffigurato l'albero di classificazione costruito invece per l'edificio C9, il quale utilizzando i livelli di consumo globali, la temperatura esterna media e il giorno della settimana riesce a classificare i dati con un errore del 25%.

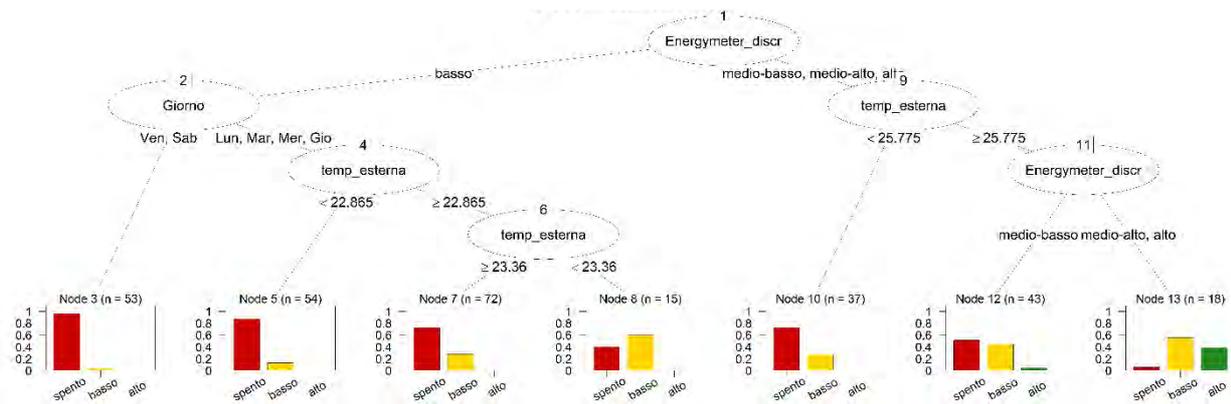


Figura 21 Albero di classificazione per la caratterizzazione dei consumi elettrici al m² dei condizionatori di C9

Utilizzando un database più ampio rispetto a quello utilizzato per il report del PAR 2017 [2], è stato possibile costruire modelli di stima del consumo al m² dei condizionatori differenti rispetto a quelli ottenuti per il report del PAR 2017 [2], per gli edifici C7 e C9, utilizzando i valori di temperatura esterna e le ore di funzionamento come input. Per ottenere modelli più robusti sono state eliminate le osservazioni che presentavano un valore predetto considerabile come *outlier* con il metodo IQR, minori di zero o con distanza di Cook maggiore di uno [2].

Modelli di regressione lineare multipla

Espressione: Ore funzionamento + temperatura esterna = Consumo al m²

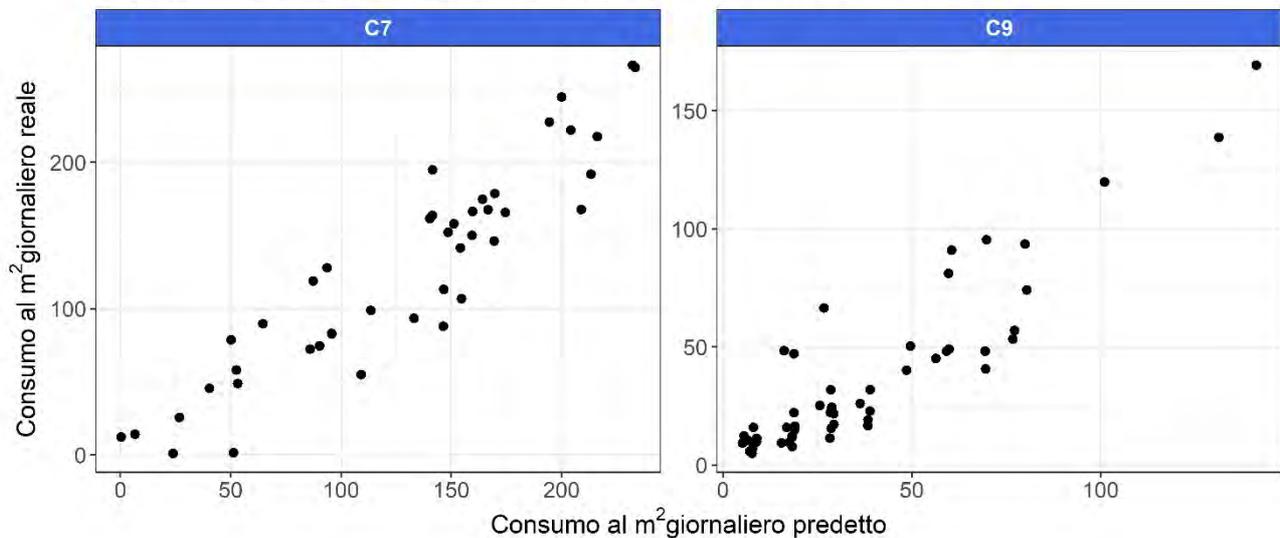


Figura 22 Scatter plot dei valori di consumo reale e predetto con modelli di regressione lineare multipla

I modelli costruiti risultano relativamente robusti, poiché presentano valori di R² elevati, rispettivamente 0.86 e 0.82 per C7 e C9, e valori p molto bassi, rispettivamente 1.4e-18 e 2.6e-21. Questi valori sono caratteristici per modelli in grado di spiegare molto bene i dati usati e con una grande significatività.

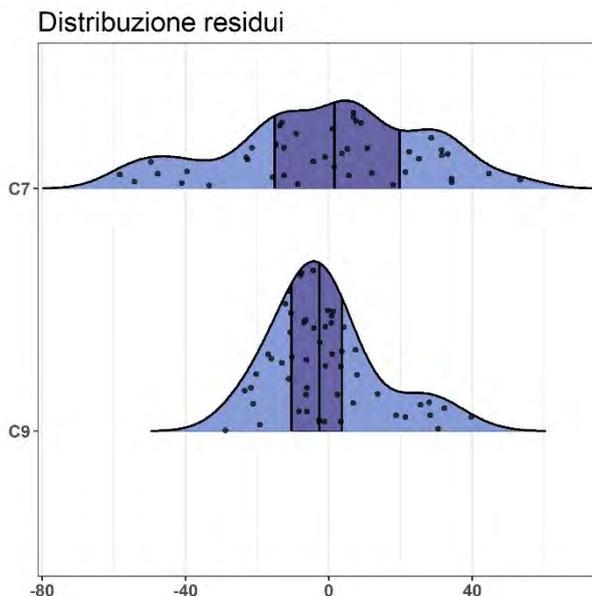


Figura 23 Distribuzione dei residui ottenuti con la costruzione dei modelli di regressione lineare multipla

Inoltre, la robustezza dei modelli è stata analizzata anche in termini di distribuzioni dei residui, calcolati come la differenza tra valore reale e valore predetto dal modello, le quali risultano simmetriche, con una forma che tende a una Gaussiana e con mediana vicina allo zero, come mostrato in Figura 23.

2.3 Scenari di gestione e automazione energetica

Attraverso il software di simulazione energetica IDA-ICE è stato analizzato l'effetto dell'implementazione di strategie intelligenti per il controllo dei sistemi automatici di una unità abitativa rappresentativa del campione analizzato. Le strategie di automazione sono state implementate per controllare i terminali di emissione, i componenti trasparenti dell'involucro e le sorgenti luminose dell'abitazione. I risultati mostrano come attraverso l'implementazione di tali logiche sia possibile conseguire un risparmio significativo in termini di energia fornita all'ambiente mantenendo al tempo stesso un livello di comfort ottimale durante i periodi di occupazione. L'implementazione di tutte le strategie di controllo ha comportato un risparmio energetico di circa 20% per il riscaldamento e di circa il 50% per il raffrescamento.

2.3.1 Caso di studio

Il caso di studio preso in esame durante questa analisi rappresenta una unità abitativa monofamiliare occupata da 4 persone e individuata, attraverso analisi parametriche, come tipologica del campione a disposizione. L'unità abitativa ha una superficie calpestabile di 86 m², è esposta su tutti e quattro i lati mentre il soffitto e il pavimento sono adiacenti ad altre unità abitative. Il rapporto tra superficie calpestabile e area finestrata è pari a 0,18. L'appartamento è stato suddiviso in tre diverse zone termiche per meglio rappresentare l'effetto dell'implementazione delle strategie di gestione. Tali zone sono rispettivamente indicate come zona giorno (comprendente salone e cucina), zona notte (comprendente tre camere da letto) e una zona sanitari (composta da due bagni). La zona giorno è stata selezionata in questo report come esempio per mostrare l'efficacia delle strategie di automazione implementate. Gli elementi opachi confinanti con l'esterno sono caratterizzati da una trasmittanza termica di 0,43 W/m²K, gli elementi trasparenti di 3,01 W/m²K con coefficienti g e Tvis pari a rispettivamente 0,77 e 0,81. Al fine di modellare il comportamento dell'occupante all'interno dell'edificio sono state definite sia delle schedule di occupazione differenti per ogni zona termica sia delle schedule di utilizzo dei principali elettrodomestici. Un esempio di tali schedule è fornito nella Figura 24.

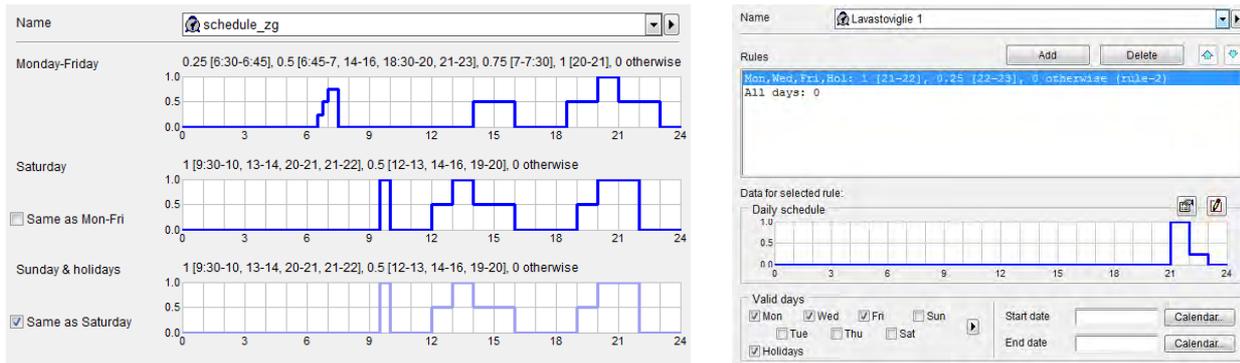


Figura 24 Schedule di occupazione e di utilizzo elettrodomestici.

2.3.2 Logiche di Controllo e Software IDA-ICE

Il software IDA-ICE permette al simulatore di andare a definire con relativa semplicità delle strategie di controllo basate su operatori logico-matematici per qualsiasi elemento dell'edificio il cui funzionamento possa essere automatizzato. I sistemi controllati, le strategie associate a ciascuno e le rispettive baseline sono brevemente descritti di seguito.

- Gli impianti di riscaldamento e raffrescamento sono stati controllati modulando la potenza dei terminali di emissione in funzione della differenza tra temperatura interna e set-point. La logica di controllo dei terminali di riscaldamento è stata progettata per riprodurre il funzionamento di una termo-valvola smart. I set-point vengono assegnati in funzione dell'occupazione della zona in modo tale da garantire il raggiungimento della temperatura all'interno della banda di comfort solo quando necessario.

Nel caso di baseline è stata ipotizzato un controllo non sensibile all'occupazione che mantenesse la temperatura di comfort durante il periodo tipico di utilizzo di ogni zona termica.

- Gli schermi integrati nei moduli finestrati vengono controllati in modo tale da controllare il livello di illuminamento interno in presenza dell'occupante. Durante il periodo estivo vengono attivati automaticamente per ridurre l'effetto degli apporti solari. Inoltre il grado di chiusura tiene conto del valore di illuminamento interno durante le ore diurne al fine di individuare un compromesso tra schermatura solare e sfruttamento della luce naturale.

Nel caso di baseline la posizione degli schermi è stata ipotizzata non controllata da un sistema di automazione mentre è stata prevista una posizione fissa con una schedule in virtù delle ore del giorno.

- Le finestre vengono aperte in presenza di occupazione all'interno dell'abitazione in funzione della qualità dell'aria interna in una determinata zona. Durante il periodo estivo l'apertura automatizzata delle finestre viene impiegata per sfruttare completamente l'effetto del free-cooling.

Nel caso di baseline l'apertura delle finestre non è regolata da un sistema di automazione e non è quindi stata modellata.

- Illuminazione artificiale viene modulata in funzione della presenza dell'occupante e del livello di illuminamento interno da garantire in ambiente e al fine di sfruttare la luce naturale durante le ore diurne.

Nel caso di baseline l'illuminazione artificiale viene attivata senza modulazione in funzione dell'illuminamento interno.

L'obiettivo di tali logiche è quello di andare a favorire un utilizzo razionale dell'energia all'interno dell'appartamento, mantenendo inalterati i livelli di comfort e, ove possibile, migliorandoli. È stato valutato non solo l'aspetto termico ma il comfort visivo e di qualità dell'aria interna. Viene riportata nella Figura 25 a titolo di esempio la logica di controllo implementata per controllare l'illuminazione artificiale all'interno della zona giorno dell'appartamento.

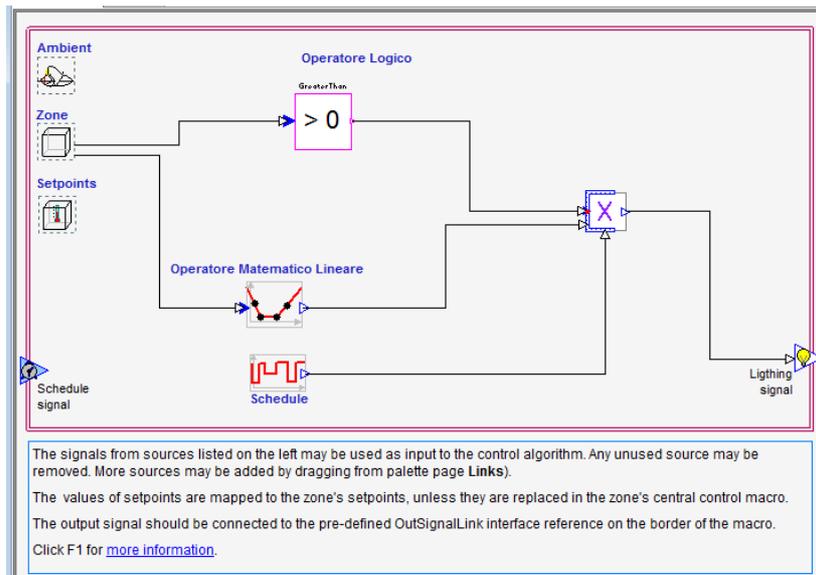


Figura 25 Schema della logica di controllo dell'illuminazione artificiale.

Come mostrato in figura la logica si sviluppa da sinistra verso destra. I diversi operatori possono ricevere input provenienti dall'ambiente esterno, dalla zona o dalle schedule e dai set-point definite dall'utente. Gli operatori logici restituiscono un segnale 1-0 nel caso che la condizione imposta si verifichi o non. Gli operatori matematici restituiscono un segnale continuo funzione della/delle variabili di input che ricevono. Nella Figura 26 è riportata una logica più articolata, impiegata per controllare il grado di abbassamento dei sistemi schermanti integrati nelle finestre dell'appartamento. Tale logica implementa funzioni di regolazione differenti per le diverse stagioni termiche in modo tale da massimizzare o mitigare l'effetto degli apporti solari garantendo un livello di illuminamento interno ottimale.

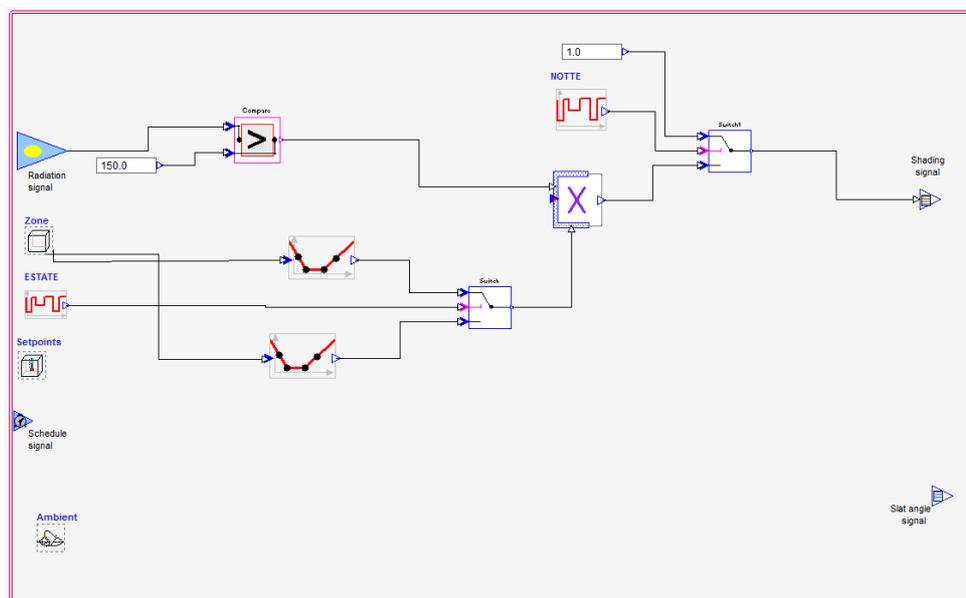


Figura 26 Logica di controllo dei sistemi schermanti integrati nelle finestre.

2.3.3 Risultati

Confrontando i risultati delle simulazioni è possibile valutare l'effetto dell'implementazione del retrofit di gestione sul fabbisogno energetico totale. Il fabbisogno di energia termica per riscaldamento si riduce del 21% mentre, il fabbisogno di energia elettrica per raffreddamento del 56%. Questi risultati dipendono fortemente dalla baseline utilizzata. Nella Figura 27 è possibile osservare la comparazione mensile del fabbisogno di energia termica ed elettrica nei due scenari ipotizzati, quello di baseline e quello con controllo automatico.

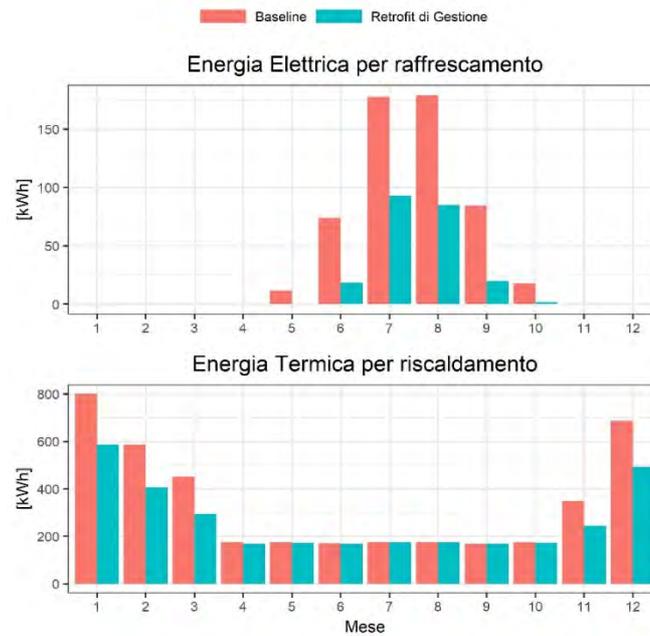


Figura 27 Istogramma di confronto mensile tra fabbisogno di energia termica e elettrica per i due casi analizzati

Tali risultati sono stati anche analizzati parametricamente andando a variare il numero di occupanti dell'appartamento. Le simulazioni effettuate con diversi livelli di occupazione dell'appartamento hanno portato a dei risultati prossimi a quelli riportati in precedenza con una variazione media del 5 – 7%.

2.3.4 Giornata tipologica stagione di riscaldamento

Nella Figura 28 sono riportati gli andamenti di temperatura interna, di potenza termica fornita all'ambiente e degli apporti solari per la zona giorno dell'appartamento durante una giornata individuata come tipologica della stagione di riscaldamento. Gli andamenti sono riportati sia per il caso di Baseline sia per il caso di retrofit di gestione. Nel caso di retrofit di gestione è interessante notare come la temperatura interna sia mantenuta all'interno del range di comfort durante i periodi di occupazione della zona (evidenziati sul grafico dalle bande verdi).

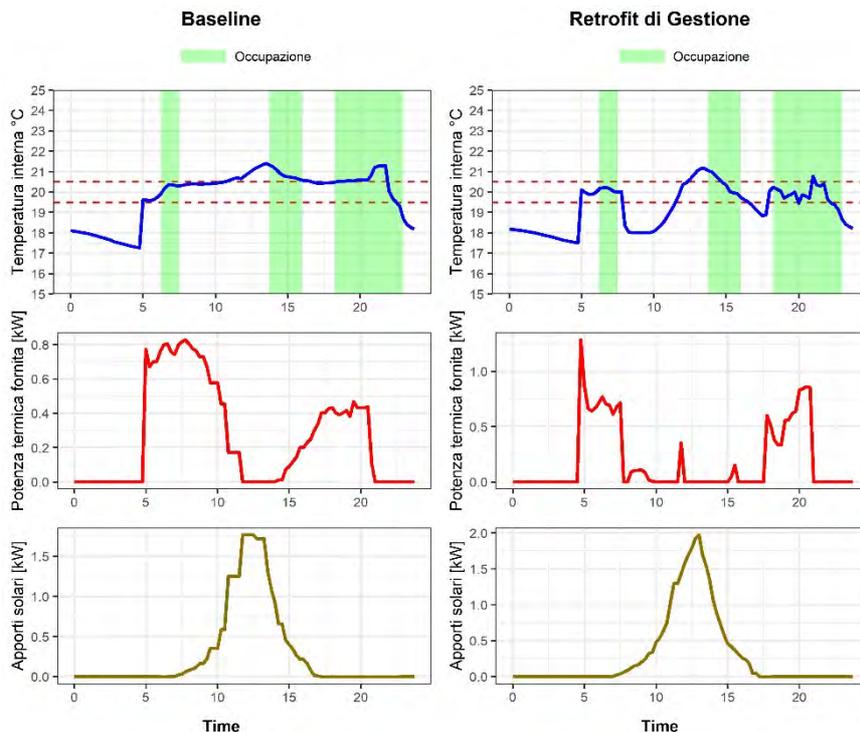


Figura 28 Giornata tipologica della stagione di riscaldamento.

2.3.5 Giornata tipologica stagione di raffrescamento

Nella Figura 29 sono rappresentati gli andamenti della temperatura interna per una zona termica dell'appartamento e delle principali variabili che la influenzano per una giornata rappresentativa della stagione di raffrescamento. Il grafico mostra un confronto tra il caso di Baseline e il caso in cui è stato effettuato il retrofit di gestione. Si osserva come durante le prime ore della mattina il sistema di automazione sfrutta il free-cooling dato dall'apertura delle finestre per abbassare la temperatura della zona modulando di conseguenza il sistema di raffrescamento. Successivamente, il sistema di automazione non rilevando occupanti nella zona non opera il raffreddamento della zona, ma sfrutta la chiusura delle schermature per non far salire la temperatura oltre i 28 °C. Il sistema di raffrescamento interviene nei periodi di occupazione per riportare la temperatura nei range di comfort. L'implementazione di tali logiche si traduce in un risparmio di energia osservabile dai grafici nella seconda riga dell'immagine.

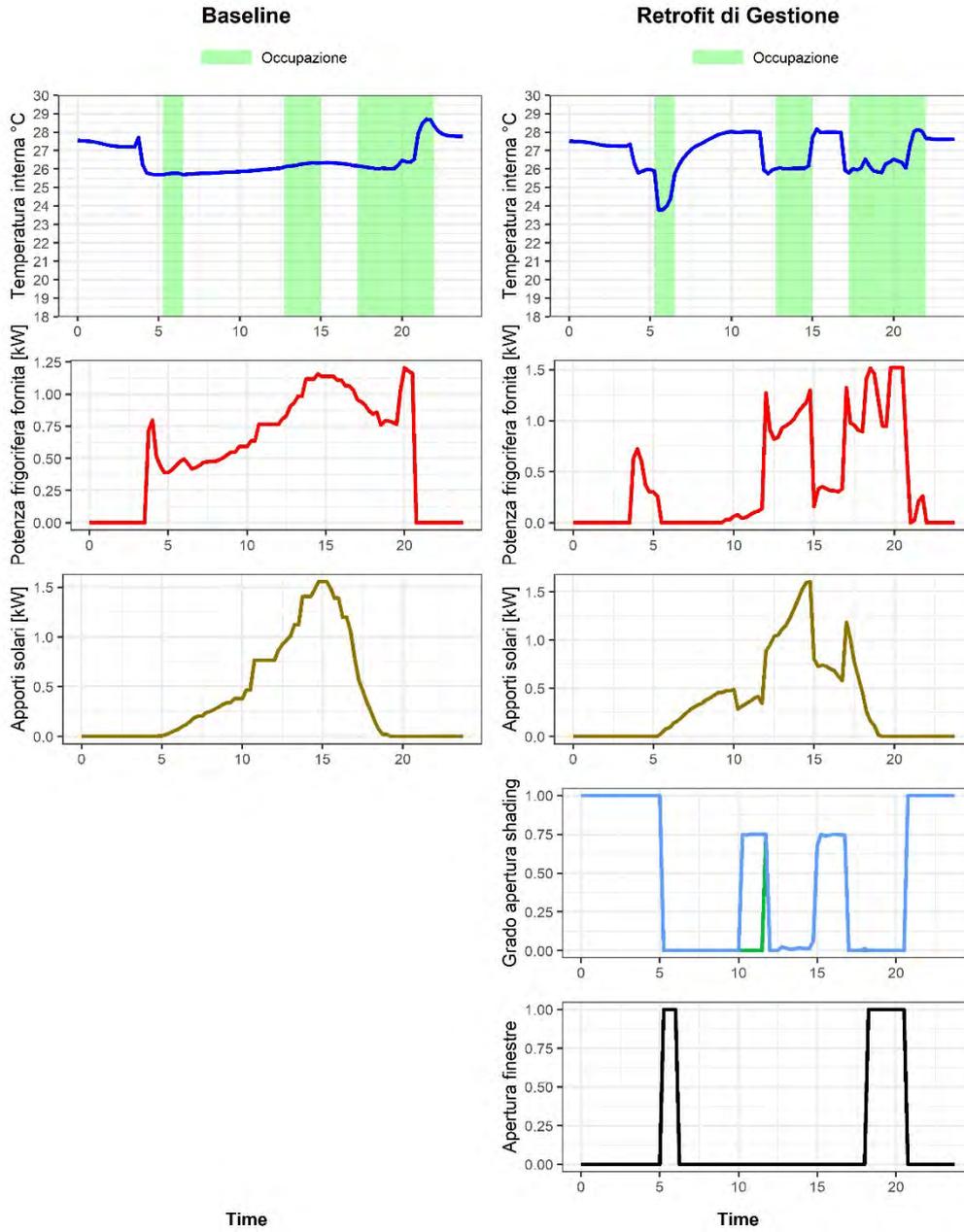


Figura 29 Giornata tipologica della stagione di raffreddamento.

3 Conclusioni

I risultati ottenuti hanno dimostrato come sia possibile caratterizzare i livelli di comfort interno delle abitazioni pilota, analizzando variabili di monitoraggio ambientale con tecniche tipiche della statistica descrittiva. Sono stati effettuati dei confronti tra i risultati ottenuti nelle diverse abitazioni, quindi analizzando l'interazione dell'occupante con il sistema, in termini di regolazione della temperatura di set-point, per giorni tipo. Il dato di temperatura di set-point rilevato da dalle smart valve è stato messo a confronto con gli andamenti di temperatura interna e esterna. Sono state evidenziate anche le correlazioni che intercorrono tra le misure di temperatura dell'aria interna o esterna con la scelta del set-point interno, trovando associazioni che giustificano i risultati ottenuti sull'analisi dei dati ambientali.

Inoltre, sono stati caratterizzati i consumi e l'utilizzo degli apparecchi di condizionamento dell'aria, attraverso tecniche di *Data Analytics* che hanno permesso di sfruttare variabili anche non tipicamente energetiche, come fascia oraria o giorno della settimana, assieme a variabili che influenzano direttamente i consumi dei condizionatori, come la temperatura esterna. La possibilità di analizzare i dati relativi a una intera stagione di raffrescamento ha permesso di avere un quadro completo dell'utilizzo degli impianti di raffrescamento, partendo solamente dalle informazioni intrinseche ai dati di monitoraggio. Inoltre, sono stati sviluppati modelli in grado di stimare i consumi giornalieri degli apparecchi di raffrescamento in modo da fornire uno strumento di previsione per dati futuri.

Infine, per un edificio tipologico e rappresentativo del parco analizzato è stato sviluppato un modello energetico e sono state simulate diverse strategie di automazione e controllo relative a differenti dispositivi (schermature, apertura finestre, sistemi di illuminazione artificiale, impianto di riscaldamento e raffrescamento). I risultati hanno dimostrato che logiche gestione ottimizzate possono comportare sensibili risparmi di energia per il riscaldamento e il raffrescamento garantendo nel contempo una buona qualità dell'ambiente interno in termini di temperatura, concentrazione di inquinanti e illuminamento

4 Riferimenti bibliografici

- [1] A. Capozzoli, S. Corgnati, M. Di Nicoli, V. Fabi, M. Piscitelli e G. Spigliantini, «Ricerca di Sistema elettrico, Report RdS/PAR2016/008, Attività di monitoraggio energetico e ambientale, diagnostica ed energy engagement degli utenti degli use case,» ENEA, Settembre 2017.
- [2] A. Capozzoli, S. Corgnati, F. Fabbro, D. Mazzarelli, G. Vergerio e S. Viazzo, «Ricerca di Sistema elettrico, Report RdS/PAR2017/008, Strategie di gestione e diagnostica della richiesta di energia per il condizionamento ambientale e della qualità termo-igrometrica di edifici pilota,» ENEA, 2018.
- [3] *UNI EN 15251: 2006. Annex A: Recommended criteria for the thermal environment*, novembre 2006.
- [4] O. A. Seppänen e W. Fisk, «Some Quantitative Relations between Indoor Environmental Quality and Work Performance or Health,» *HVAC&R Research*, vol. 12, n. 4, pp. 957-973, 2006.
- [5] The Weather Company, «Weather underground,» settembre 2018. [Online]. Available: <https://www.wunderground.com/>.
- [6] J. Han, M. Kamber and J. Pei, in *Data mining: concepts and techniques*, Morgan Kaufmann, 2011.
- [7] N. Pham, Q. Le e T. Dang, «HOT aSAX: A Novel Adaptive Symbolic Representation for Time Series Discords Discovery,» in *Intelligent Information and Database Systems. ACIIDS 2010*, 2010.
- [8] A. Capozzoli, S. Corgnati, F. Fabbro, D. Mazzarelli, G. Vergerio e S. Viazzo, «Ricerca di Sistema elettrico, Report RdS/PAR2017/008, Strategie di gestione e diagnostica della richiesta di energia per il condizionamento ambientale e della qualità termo-igrometrica di edifici pilota,» ENEA, 2018.