



## Ricerca di Sistema elettrico

# Strategie di gestione e diagnostica della richiesta di energia per il condizionamento ambientale e della qualità termo-igrometrica di edifici pilota

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

## STRATEGIE DI GESTIONE E DIAGNOSTICA DELLA RICHIESTA DI ENERGIA PER IL CONDIZIONAMENTO AMBIENTALE E DELLA QUALITÀ TERMO-IGROMETRICA DI EDIFICI PILOTA

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

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Progetto: D.6 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 *“Definizione e sviluppo di strategie di gestione e diagnostica energetica per l'ottimizzazione della richiesta di energia termica e della qualità ambientale di edifici pilota”*

Responsabile scientifico ENEA: Sabrina Romano

Responsabile scientifico: A. Capozzoli, S. P. Corgnati

## Indice

### 1 Sommario

INTRODUZIONE.....	4
2 CASI PILOTA E DESCRIZIONE DEL DATA-SET.....	5
2.1 SIGNIFICATIVITÀ E QUALITÀ DELLA BASE DI DATI DISPONIBILI.....	6
3 ANALISI DELLA QUALITÀ TERMO-IGROMETRICA DEGLI AMBIENTI INTERNI.....	19
3.1 EDIFICI E2016 – AGGREGATORE 1.....	19
3.2 EDIFICI C2017 – AGGREGATORE 2.....	31
4 ANALISI DEI CONSUMI PER LA CLIMATIZZAZIONE AMBIENTALE.....	40
4.1 CARATTERISTICHE DEI CONDIZIONATORI.....	40
4.2 CARATTERIZZAZIONE DEI CONSUMI ELETTRICI ATTRAVERSO TECNICHE DI DATA ANALYTICS.....	41
4.2.1 Edificio C1 (Aggregatore 2).....	45
4.2.2 Edificio C3 (Aggregatore 2).....	47
4.2.3 Edificio C5 (Aggregatore 2).....	48
4.2.4 Edificio C6 (Aggregatore 2).....	49
4.2.5 Edificio C7 (Aggregatore 2).....	50
4.2.6 Edificio C9 (Aggregatore 2).....	52
4.2.7 Discussione.....	53
5 ANALISI DI BENCHMARKING.....	53
6 IMPLEMENTAZIONE DI STRATEGIE DI GESTIONE ENERGETICA INTELLIGENTE.....	74
6.1 OBIETTIVI E METODOLOGIA DELLA SPERIMENTAZIONE.....	74
6.2 INFORMAZIONI GENERALI SUL CASO STUDIO E COSTRUZIONE DEL MODELLO DINAMICO.....	74
6.3 CALIBRAZIONE DEL MODELLO ENERGETICO.....	80
6.4 DEFINIZIONE DELLE LOGICHE DI CONTROLLO.....	81
6.5 FASE 1: PROGETTAZIONE DEGLI ALGORITMI DI CONTROLLO.....	81
6.6 IMPLEMENTAZIONE DEGLI ALGORITMI DI CONTROLLO NEL MODELLO DI SIMULAZIONE DINAMICA.....	85
6.7 ANALISI DEI RISULTATI: MODELLO DI IMPLEMENTAZIONE.....	90
6.8 FASE 2: PROGETTAZIONE DEGLI ALGORITMI DI CONTROLLO.....	93
6.9 ANALISI DEI RISULTATI: MODELLO DI IMPLEMENTAZIONE FASE1+FASE 2.....	93
7 CONCLUSIONI.....	94
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	95
9 CURRICULUM VITAE DEGLI AUTORI DEL RAPPORTO TECNICO.....	97
ALFONSO CAPOZZOLI.....	97
STEFANO PAOLO CORGNATI.....	97
FRANCESCO FABBRO.....	97
DANIELE MAURO MAZZARELLI.....	98
GIULIA VERGERIO.....	98
SARA VIAZZO.....	98

## Introduzione

Il presente documento sintetizza le attività condotte dal Politecnico di Torino riguardanti l'analisi dei dati di monitoraggio provenienti da quattordici edifici pilota, che sono parte di una sperimentazione condotta da ENEA finalizzata a ottimizzare la gestione di edifici residenziali. Tutte le abitazioni sono localizzate nel Comune di Roma e sono state organizzate in questo studio in due diversi gruppi: 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 e si sono aggiunte alle quattro sopramenzionate grazie all'installazione di un sistema di monitoraggio che ha avuto luogo nel maggio del 2018. Nel presente documento ci si riferirà ai due gruppi come "E2016" o "Aggregatore 1" (quattro abitazioni) ed "C2017" o "Aggregatore 2" (dieci 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. Successivamente, considerata la tipologia di dati disponibili per i diversi gruppi di abitazioni E2016 e C2017, le analisi condotte hanno differito per alcuni aspetti rilevanti.

In particolare, gli studi condotti su **E2016 (Aggregatore 1)** hanno avuto lo scopo di analizzare la qualità termogrametrica degli ambienti interni. Attraverso analisi afferenti alla statistica descrittiva, sono state studiate le variabili temperatura di bulbo asciutto ed umidità relativa interna agli ambienti nel periodo di monitoraggio disponibile (luglio 2017- marzo 2018); per le stesse variabili è stata analizzata la frequenza di distribuzione. Frequenze e andamenti per giornate tipologiche sono stati messi in relazione alle temperature esterne e ai limiti raccomandati da UNI EN ISO 7730 [2]. Lo stesso tipo di analisi è stata condotta per i casi pilota **C2017 (Aggregatore 2)**, con riferimento anche ai requisiti di comfort previsti della norma UNI EN 15251 [3]. Tuttavia, la natura dei casi pilota **C2017**, in cui sono installati impianti di condizionamento estivo, per i quali si disponeva dei relativi consumi di energia elettrica, ha aperto alla possibilità di svolgere analisi sui consumi per la climatizzazione per il periodo aprile-agosto 2018, valutandone le possibili correlazioni con altri parametri monitorati. In particolare, i dati di assorbimento elettrico sono stati analizzati in modo tale da estrarre, tramite tecniche di *Data Analytics*, profili tipologici, correlazioni e fattori influenzanti. In questo modo, è stato caratterizzato l'utilizzo delle apparecchiature elettriche, in particolare di quelle legate alla climatizzazione degli ambienti.

Le tecniche utilizzate per l'estrazione di conoscenza dal data-set, sono state scelte in modo da operare un processo automatico e non supervisionato. Per quanto riguarda i consumi non monitorati, le tecniche impiegate per la descrizione del comportamento del sistema hanno previsto l'uso di dati da bolletta.

Tali analisi hanno consentito di individuare metodologie utili alla descrizione del comportamento del sistema in termini di caratteristiche termogrametriche e consumi. L'obiettivo dello studio è consistito poi nel provvedere analisi diagnostiche delle abitazioni E2016 e C2017 rispetto a quelle stesse aree di indagine. Esse sono state condotte tramite tecniche di *benchmarking*, previa identificazione di opportuni indicatori di performance (*key performance indicators* o KPIs), ad esempio il numero di ore durante le quali sono garantite le condizioni di comfort in ambiente. Il posizionamento delle abitazioni rispetto ai valori di *benchmark* individuati è stato discusso in relazione ad alcuni fattori influenzanti quali il tipo di occupazione, le caratteristiche di involucro, ecc.

Questo report, mostrando le metodologie applicate sui dati raccolti, mette in evidenza le potenzialità offerte dall'analisi dei dati, considerando che la crescente penetrazione di sistemi di monitoraggio negli edifici consente di estrarre una conoscenza più approfondita e dettagliata delle abitudini e delle caratteristiche del sistema considerato. Infatti, un alto numero di variabili monitorate può portare a una descrizione accurata delle condizioni in cui si trova il sistema e delle attività svolte, fornendo anche la base per la previsione delle condizioni future del sistema stesso. Vale la pena sottolineare, però, che la qualità dei dati gioca un ruolo fondamentale, poiché una alta presenza di dati non validi, derivanti da monitoraggio incostante o con letture anomale, rendono più difficile l'ottenimento di risultati consistenti dalla loro analisi.



## 2 Casi pilota e descrizione del data-set

La sperimentazione ha riguardato quattordici casi di studio, tutte abitazioni ubicate nel territorio del Comune di Roma. Quattro di questi appartamenti si trovano in edifici bifamiliari, uno occupa un intero edificio isolato, mentre i restanti nove si trovano in edifici plurifamiliari. Solamente due degli edifici risalgono alla prima metà del secolo scorso, la maggior parte sono stati costruiti tra il 1945 e il 1990 mentre due sono di recente costruzione (anni '90 e 2000). Le caratteristiche geometriche sono piuttosto eterogenee. Infatti, sei delle quattordici abitazioni non raggiungono i 70 m<sup>2</sup>, una supera i 90 m<sup>2</sup>, mentre le restanti hanno una superficie compresa tra 100 m<sup>2</sup> e 135 m<sup>2</sup>. In quasi tutti gli appartamenti c'è stato un intervento di sostituzione dei serramenti che ne ha migliorato la prestazione energetica. Tutte le abitazioni hanno impianto di riscaldamento autonomo alimentato a gas naturale (anche se in alcuni casi integrato da termo-camini). Il gas è la principale fonte energetica utilizzata anche per il soddisfacimento del fabbisogno di acqua calda sanitaria, che solo per un'abitazione è prodotta tramite pompa di calore elettrica. L'impianto di climatizzazione estiva non è sempre presente. In particolare, le quattro abitazioni di E2016 sono sprovviste di tale servizio, mentre nove di dieci appartamenti pilota del gruppo C2017 possiedono un sistema di condizionamento estivo.

I dati ottenuti dai due gruppi di abitazioni sono diversi e riguardano sia dati di microclima interno, come temperatura interna e umidità relativa, sia dati di assorbimento elettrico. Tutti i dati sono campionati con frequenza quarti oraria grazie ad una elaborazione dei dati grezzi operata da ENEA. I parametri monitorati non sono uguali per tutti gli edifici dei due casi studio, poiché il sistema di monitoraggio installato differisce nella tipologia di sensori presente. La Tabella 1 sintetizza le grandezze misurate rilevanti per lo studio riferito di seguito (Sezioni 3, 4, 5).

**Tabella 1** Parametri monitorati di interesse rispetto allo studio condotto e periodo di monitoraggio per ciascuna delle abitazioni

	Parametri monitorati di interesse				Periodo di monitoraggio
	Temperatura interna [°C]	Umidità relativa [%]	Potenza generale [W]	Potenza climatizzazione [W]	
<b>E3</b>	x	x			Luglio 2017 – Marzo 2018
<b>E4</b>	x				Marzo 2018
<b>E8</b>	x	x			Luglio 2017 – Marzo 2018
<b>E9</b>	x	x			Luglio 2017 – Marzo 2018
<b>C1</b>	x		x	x	Aprile 2018 – Agosto 2018
<b>C2</b>	x		x		Aprile 2018 – Agosto 2018
<b>C3</b>	x		x	x	Aprile 2018 – Agosto 2018
<b>C4</b>	x		x		Aprile 2018 – Agosto 2018
<b>C5</b>	x		x	x	Aprile 2018 – Agosto 2018
<b>C6</b>	x		x	x	Aprile 2018 – Agosto 2018
<b>C7</b>	x		x	x	Aprile 2018 – Agosto 2018
<b>C8</b>	x		x		Aprile 2018 – Agosto 2018
<b>C9</b>	x		x	x	Aprile 2018 – Agosto 2018
<b>C10</b>	x		x	x	Aprile 2018 – Agosto 2018

## 2.1 Significatività e qualità della base di dati disponibili

- E2016 – parametri ambientali

È stata condotta un'analisi volta a verificare la qualità del data-set a disposizione. In particolare, è stata valutata la qualità dei dati di temperatura e umidità relativa in termini di grado di copertura, intesa come la percentuale di *record* presenti nel periodo di monitoraggio; è stata inoltre condotta un'analisi di identificazione di *outlier* per le variabili esaminate attraverso l'analisi della distribuzione in frequenza visualizzata con un *box plot*. Questi sono stati eliminati dal data-set, in quanto valori statisticamente anomali rispetto alla distribuzione della variabile oggetto di analisi.

Questo studio ha consentito di preparare un robusto data base, e di selezionare i periodi e gli ambienti da analizzare. In particolare, la scelta è stata condotta sulla base della continuità e significatività dei dati disponibili. In questa fase l'edificio E4 è stato escluso dalle successive analisi relativamente ai parametri ambientali per via della scarsa significatività del data-set.

Di seguito viene riassunto per punti il processo di analisi ed elaborazione del data-set adottato per i casi pilota E8, E9 ed E3.

1. Segmentazione del data-set in periodo estivo ed invernale;
2. Identificazione degli *outlier*;
3. Calcolo di indicatori statistici descrittivi del data-set: percentuale di record presenti nel periodo;
4. Eliminazione delle giornate non significate (aventi un numero molto limitato di *record*);
5. Calcolo di indicatori statistici descrittivi del data-set: percentuale di record medi giornalieri;
6. Visualizzazione degli andamenti della serie di dati.

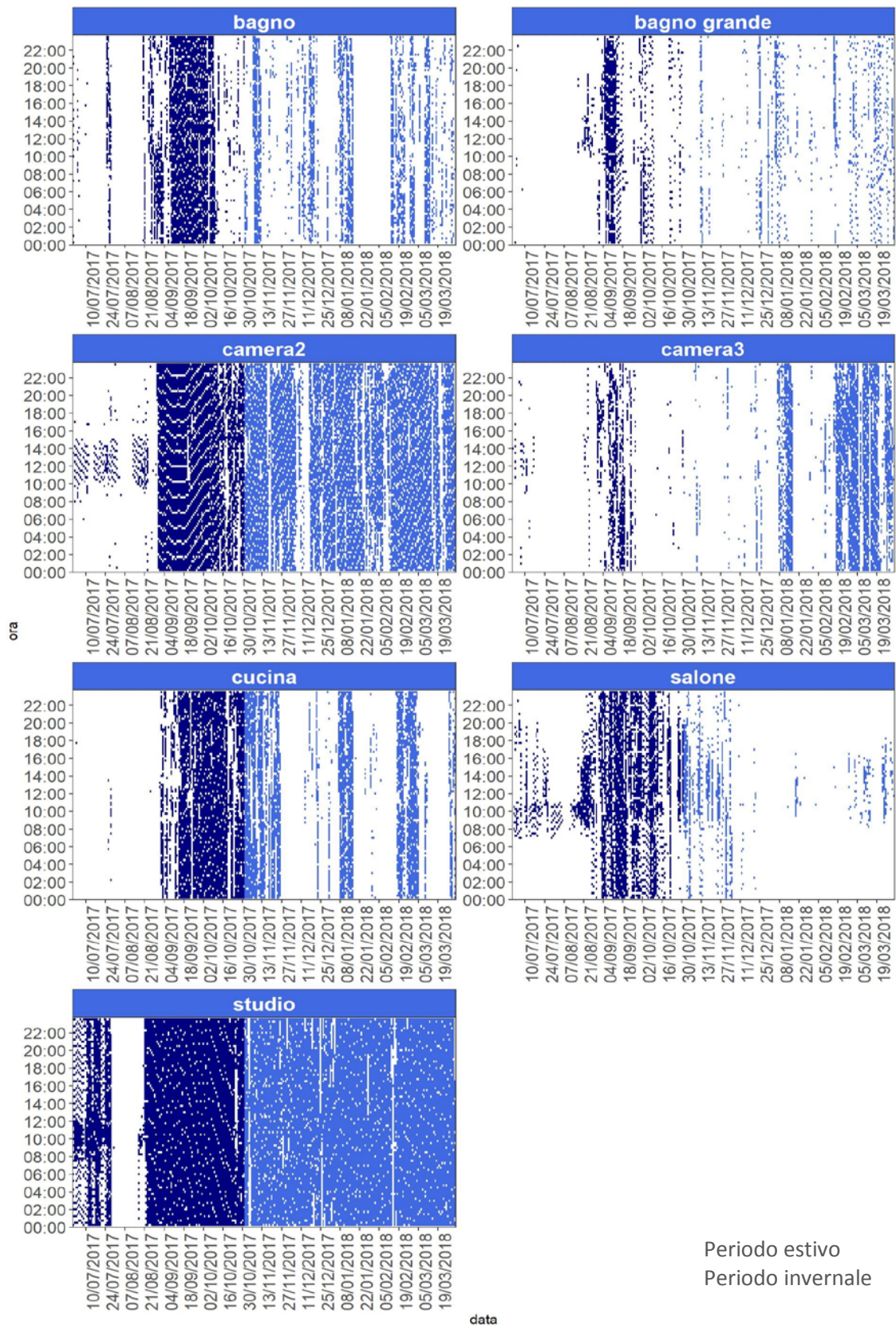
Tale analisi è stata condotta per ciascun ambiente delle tre abitazioni, relativamente sia al parametro di temperatura che di umidità relativa.

Di seguito vengono riassunte, tramite rappresentazioni grafiche e relativi indicatori, le caratteristiche del data-set per le tre abitazioni E8, E9 ed E3.

- E8 – parametri ambientali

L'abitazione, di circa 120 m<sup>2</sup>, è collocata al piano superiore di una villa isolata ed è composta da sette ambienti: salone, cucina, studio, due camere da letto e due bagni. In ogni ambiente è presente un sensore Eltako misurante temperatura e umidità relativa. Il database di partenza era quindi costituito da dati quarti orari di temperatura e umidità relativa interne per ciascun ambiente distribuiti nell'intero periodo di monitoraggio (01/07/2017 – 31/03/2018).

In prima battuta si è partito il database in due segmenti: periodo estivo (01/07/2017 – 31/10/2017) e periodo invernale (01/11/2017 – 31/03/2018), come identificati dal DPR 412/93 per la zona climatica D. Poi, per i due parametri misurati nei sette ambienti monitorati è stato tracciato un *box plot*, rappresentante la distribuzione dei record, al fine di rilevare la presenza di eventuali *outlier* nel data-set, definiti come valori statisticamente anomali, in quanto distanti più di una volta e mezzo dell'interquartile dal primo quartile (inferiori) e dal terzo (superiori). Tali valori, risultati spesso presenti, sono stati eliminati dal data-set. I grafici seguenti mostrano la continuità dei record di temperatura presenti nel data-set per i sette ambienti a valle della rimozione degli *outlier*. Simile copertura è garantita per il dato di umidità relativa.



**Figura 1** copertura giornaliera dei record di temperatura per i diversi ambienti dell'abitazione nel periodo di monitoraggio, estivo (01/07/2017 – 31/10/2017) e invernale (01/11/2017 – 31/03/2018)

Il grado di copertura del data-set relativo ai diversi ambienti è misurato come percentuale di valori quarti orari presenti nel data-set, prima e dopo la rimozione degli *outlier*, sulla totalità dei record che si sarebbero dovuti registrare in ciascun ambiente nell'intero periodo di monitoraggio.

**Tabella 2** numero di record e % di copertura sul periodo di monitoraggio per i diversi ambienti dell'abitazione nel PERIODO ESTIVO (01/07/2017 – 31/10/2017)

Ambiente	N. record data-set		% copertura		Riduzione % copertura*	
	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.
Salone	3518	3518	30%	30%	-0,35%	-0,57%
<b>Studio</b>	<b>7925</b>	<b>7925</b>	<b>67%</b>	<b>67%</b>	<b>-0,00%</b>	<b>-0,46%</b>
Cucina	4215	4215	36%	36%	-2,88%	-1,32%
<b>Camera 1</b>	<b>4935</b>	<b>4935</b>	<b>42%</b>	<b>42%</b>	<b>-1,04%</b>	<b>-2,37%</b>
Camera 2	946	946	8%	8%	-0,52%	-0,49%
Bagno	3406	3406	29%	29%	-0,59%	-0,93%
Bagno grande	1218	1217	10%	10%	-0,17%	-0,19%

\* dovuta alla rimozione degli *outliers*, identificati tramite il metodo del *box plot*.

**Tabella 3** numero di record e % di copertura sul periodo di monitoraggio per i diversi ambienti dell'abitazione nel PERIODO INVERNALE (01/11/2017 – 31/03/2018)

Ambiente	N. record data-set		% copertura		Riduzione % copertura*	
	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.
Salone	967	967	7%	7%	-0,40%	-0,12%
<b>Studio</b>	<b>13061</b>	<b>13061</b>	<b>90%</b>	<b>90%</b>	<b>-0,92%</b>	<b>-0,95%</b>
Cucina	3960	3960	27%	27%	-0,21%	-0,59%
<b>Camera 1</b>	<b>9652</b>	<b>9652</b>	<b>67%</b>	<b>67%</b>	<b>-0,79%</b>	<b>-1,34%</b>
Camera 2	3455	3455	24%	24%	-0,77%	-0,18%
Bagno	2801	2801	19%	19%	-0,37%	-0,30%
Bagno grande	1151	1152	8%	8%	-0,37%	-0,35%

\* dovuta alla rimozione degli *outliers*, identificati tramite il metodo del *box plot*.

Come si può osservare dai grafici e dalle tabelle sovrastanti (Figura 1, Tabella 2, Tabella 3), il data-set, rispetto alla totalità del periodo estivo e di quello invernale, garantisce una copertura eterogenea tra i diversi ambienti: si passa da una copertura del 90% per i dati rilevati nello studio nel periodo invernale, ad un 7% nel salone per lo stesso periodo. Nei periodi coperti, anche la continuità dei dati è molto eterogenea tra ambienti.

Nello specifico, per tutti gli ambienti monitorati sono presenti dati quarti orari di temperatura e umidità relativa a partire da inizio luglio fino al 31 di marzo, ma con continuità e gradi di copertura mensile e giornaliera molto differenti. Considerando sia il periodo estivo che quello invernale (274 giornate), la tabella seguente (Tabella 4) mostra il numero di giornate per le quali vi sia una copertura almeno superiore alle 5 ore sia per il dato di temperatura che di umidità per i diversi ambienti e la percentuale di copertura giornaliera media mensile.

**Tabella 4** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Salone		Studio		Cucina		Camera 1		Camera 2		Bagno		Bagno gr	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Luglio	1	33%	27	60%	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	4	39%	0	n.a.
Agosto	8	31%	11	86%	0	n.a.	1	83%	1	35%	8	39%	1	27%
Settembre	30	63%	30	93%	23	66%	30	82%	14	45%	27	74%	13	57%
Ottobre	22	48%	31	91%	30	79%	31	68%	0	0%	13	59%	5	33%
Novembre	13	39%	29	88%	26	65%	29	75%	1	25%	7	60%	2	38%



<i>Dicembre</i>	3	38%	<b>31</b>	87%	3	40%	<b>23</b>	69%	4	27%	10	46%	3	49%
<i>Gennaio</i>	0	0%	<b>31</b>	93%	11	75%	<b>31</b>	67%	10	64%	9	58%	4	33%
<i>Febbraio</i>	0	0%	<b>27</b>	91%	10	71%	<b>27</b>	68%	12	66%	11	48%	1	49%
<i>Marzo</i>	1	24%	<b>31</b>	93%	11	55%	<b>28</b>	73%	24	72%	11	55%	8	27%
	<b>78</b>	39%	<b>248</b>	87%	<b>113</b>	65%	<b>200</b>	73%	<b>66</b>	48%	<b>100</b>	52%	<b>37</b>	39%

Come si può osservare dalla tabella sovrastante (Tabella 4), il periodo di analisi per il salone, la camera2 e il bagno grande è assolutamente poco esteso, pertanto da escludere dall'analisi per scarsa significatività. Cucina, camera1 e bagno garantiscono maggiore estensione del periodo analizzabile, ma dei tre solo la camera garantisce una certa continuità settimanale e mensile. Lo studio presenta invece il data-set più esteso e continuo.

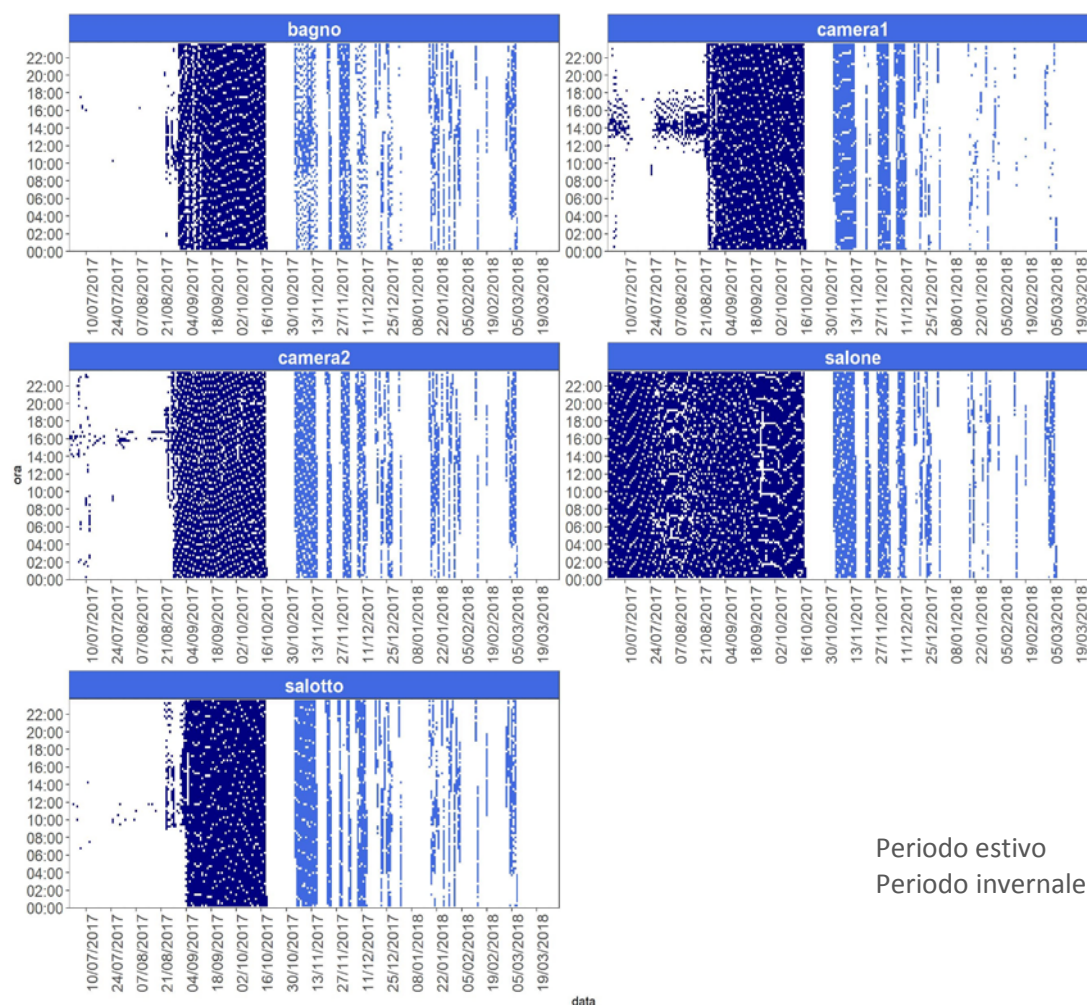
Da queste analisi è discesa la scelta di svolgere le successive elaborazioni sui dati quarti orari e medi orari dei soli due ambienti dal data-set significativo, studio e camera1. Essi infatti sono caratterizzati dal data-set con la più alta copertura sia stagionale che giornaliera media, condizione che garantisce alle analisi condotte su di essi una maggiore rappresentatività del variare delle condizioni ambientali. A causa della generale mancanza di continuità nel data-set, le analisi riguardo gli andamenti medi orari sono state svolte per giorni tipo, mentre la frequenza con la quale i parametri rispettano certe condizioni è stata misurata calcolato il dato medio giornaliero. Tali analisi sono riferite in Sezione 3.1.

o E9 – parametri ambientali

L'abitazione, di circa 120 m<sup>2</sup>, è collocata al piano terra di una villa isolata ed è composta da sei ambienti: salone, soggiorno, due camere da letto e due bagni. In ogni ambiente, escluso uno dei due bagni, è presente un sensore Eltako misurante temperatura e umidità relativa. Il database di partenza era quindi costituito da dati quarti orari di temperatura e umidità relativa interne per cinque ambienti distribuiti nell'intero periodo di monitoraggio (01/07/2017 – 31/03/2018).

In prima battuta si è partito il database in due segmenti: periodo estivo (01/07/2017 – 31/10/2017) e periodo invernale (01/11/2017 – 31/03/2018), così come definiti dal DPR 42/93 per la zona climatica D. Poi, per i due parametri misurati nei cinque ambienti monitorati è stato tracciato un *box plot*, rappresentante la distribuzione dei record, al fine di rilevare la presenza di eventuali *outlier* nel data-set, definiti come valori statisticamente anomali, in quanto distanti più di una volta e mezzo dell'interquartile dal primo quartile (inferiori) e dal terzo (superiori). Tali valori, risultati spesso presenti, sono stati eliminati dal data-set. I grafici seguenti mostrano la continuità dei record di temperatura presenti nel data-set per i cinque ambienti a valle della rimozione degli *outlier*. Simile copertura è garantita per il dato di umidità relativa.





Periodo estivo  
Periodo invernale

**Figura 2** copertura giornaliera dei record di temperatura per i diversi ambienti dell’abitazione nel periodo di monitoraggio, estivo (01/07/2017 – 31/10/2017) e invernale (01/11/2017 – 31/03/2018)

Il grado di copertura del data-set relativo ai diversi ambienti è misurato come percentuale di valori quarti orari presenti nel data-set, prima e dopo la rimozione degli *outlier*, sulla totalità dei record che si sarebbero dovuti registrare in ciascun ambiente nell’intero periodi di monitoraggio.

**Tabella 5** numero record e % di copertura sul periodo di monitoraggio per i diversi ambienti dell’abitazione nel PERIODO ESTIVO (01/07/2017 – 31/10/2017)

Ambiente	N. record data-set		% copertura		Riduzione % copertura*	
	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.
Salone	8900	8900	75%	75%	-0%	-1,36%
Salotto	4244	4244	36%	36%	-0,69%	-0,74%
Camera 1	5031	5031	43%	43%	-0,36%	-1,03%
Camera 2	4247	4247	36%	36%	0,29%	-0,88%
Bagno	4079	4079	35%	35%	0,55%	-0,47%

\* dovuta alla rimozione degli *outliers*, identificati tramite il metodo del *box plot*.

**Tabella 6** numero record e % di copertura sul periodo di monitoraggio per i diversi ambienti dell’abitazione nel PERIODO INVERNALE (01/11/2017 – 31/03/2018)

Ambiente	N. record data-set	% copertura	Riduzione % copertura*
----------	--------------------	-------------	------------------------

	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.
Salone	3287	3287	28%	28%	-0,25%	-0,07%
Salotto	3553	3553	30%	30%	-1,30%	-1,34%
Camera 1	2734	2734	23%	23%	-0,42%	-0,17%
Camera 2	3387	3387	29%	29%	-0,11%	-0,04%
Bagno	2730	2730	23%	23%	-0,79%	-0,85%

\* dovuta alla rimozione degli *outliers*, identificati tramite il metodo del *box plot*.

Come si può osservare dai grafici e dalle tabelle sovrastanti (Figura 2, Tabella 5 e Tabella 6), il data-set, rispetto alla totalità del periodo estivo e di quello invernale, garantisce una copertura piuttosto scarsa, che passa dal 23% dei record per il bagno ad un massimo del 30% per il salotto. Nei periodi coperti, la continuità dei dati è molto eterogenea tra ambienti.

Nello specifico, per tutti gli ambienti monitorati sono presenti dati quarti orari di temperatura e umidità relativa a partire da inizio luglio fino al 8 marzo, ma con continuità e gradi di copertura mensile e giornaliera molto differenti. Considerando sia il periodo estivo che quello invernale (274 giornate), la Tabella 7 mostra il numero di giornate per le quali vi sia una copertura almeno superiore alle 5 ore sia per il dato di temperatura che di umidità per i diversi ambienti e la percentuale di copertura giornaliera media.

**Tabella 7** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Salone		Salotto		Camera 1		Camera 2		Bagno	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Luglio	31	85%	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
Agosto	31	79%	2	28%	7	64%	6	54%	2	53%
Settembre	30	84%	29	87%	30	89%	30	81%	30	80%
Ottobre	18	87%	18	91%	18	88%	18	81%	18	87%
Novembre	18	82%	18	84%	16	85%	17	73%	17	52%
Dicembre	18	54%	15	60%	15	61%	20	55%	15	48%
Gennaio	6	46%	9	39%	2	44%	11	47%	9	45%
Febbraio	3	34%	6	41%	0	n.a.	6	39%	5	41%
Marzo	6	54%	6	49%	1	31%	6	51%	6	50%
	<b>161</b>	<b>68%</b>	<b>103</b>	<b>60%</b>	<b>89</b>	<b>66%</b>	<b>114</b>	<b>60%</b>	<b>102</b>	<b>57%</b>

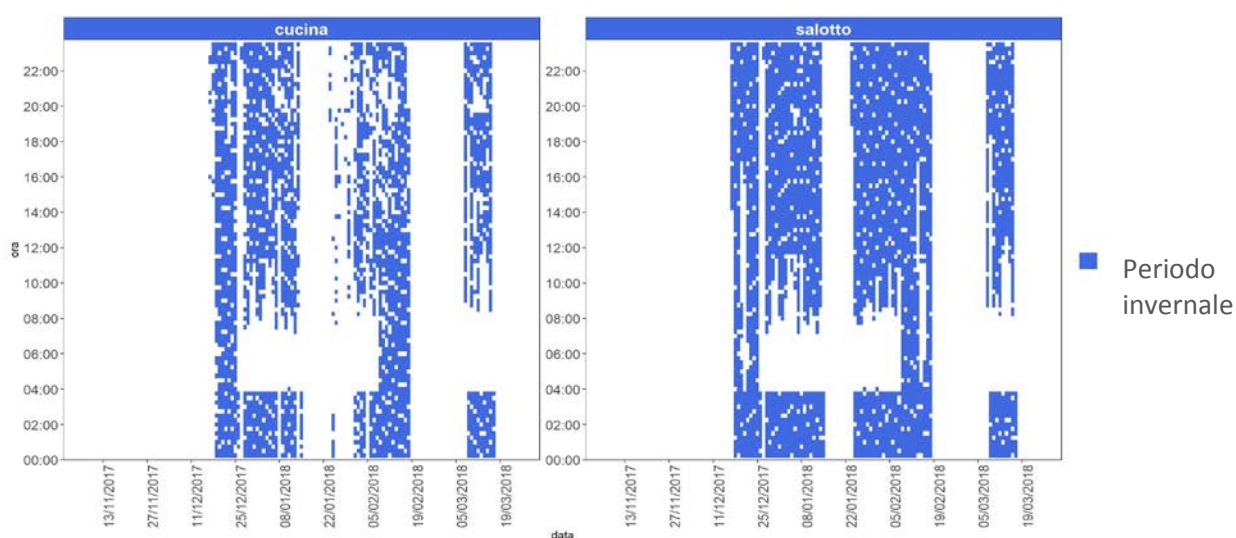
Come si può osservare dalla tabella sovrastante (Tabella 7), tutti gli ambienti presentano una scarsa continuità nel periodo invernale, nel quale anche la copertura giornaliera è peggiore che in quello estivo. Il salone presenta il data-set più esteso e coperto. Salone e camera1 hanno la più alta copertura giornaliera media, rispettivamente del 68% e 66%.

Da queste analisi è discesa la scelta di limitare l'analisi dei dati quarti orari a salone e camera 1, aventi una copertura giornaliera maggiore, condizione che garantisce alle analisi condotte su di essi una maggiore rappresentatività del variare delle condizioni ambientali. Data la generale scarsa continuità mensile, le successive elaborazioni sull'andamento dei valori medi orari sono state svolte relativamente a giornate tipo e coincidenti con il caso pilota E8, a meno delle giornate del 2018 analizzate per E8, in quanto il data-set di E9 nei mesi del 2018 è risultato scarso. Per lo stesso motivo di discontinuità del database, la frequenza con la quale i parametri rispettano certe condizioni è stata misurata calcolato il dato medio giornaliero. Tali analisi sono riferite in Sezione 3.1.

- o E3 – parametri ambientali

L'abitazione, di circa 65 m<sup>2</sup>, è collocata in un piano intermedio di un edificio multifamiliare ed è composta da cinque ambienti: soggiorno, cucina, due camere da letto e un bagno. Gli unici due ambienti dove sia presente un sensore Eltako misurante temperatura e umidità relativa sono il soggiorno e la cucina. Il database di partenza era quindi costituito da dati quarti orari di temperatura e umidità relativa interne per due ambienti non distribuiti nell'intero periodo di monitoraggio (01/07/2017 – 31/03/2018), ma solo nella stagione invernale (01/11/2017 – 31/03/2018).

Mentre per i casi studio E8 ed E9 è stato possibile partire il database in periodo estivo (01/07/2017 – 31/10/2017) ed invernale (01/11/2017 – 31/03/2018), così come identificati dal DPR 412/93 per la zona climatica D, E3 non presenta nessun dato precedente al dicembre 2017, dunque solo il periodo invernale è stato preso in considerazione. Per i due parametri misurati nei due ambienti monitorati è stato tracciato un *box plot*, rappresentante la distribuzione dei record, al fine di rilevare la presenza di eventuali *outlier* nel data-set, definiti come valori statisticamente anomali, in quanto distanti più di una volta e mezzo dell'interquartile dal primo quartile (inferiori) e dal terzo (superiori). Tali valori, risultati spesso presenti, sono stati eliminati dal data-set. I grafici seguenti mostrano la continuità dei record di temperatura presenti nel dataset per i due ambienti a valle della rimozione degli *outlier*. La stessa copertura è garantita per il dato di umidità relativa.



**Figura 3** copertura giornaliera dei record di temperatura per i diversi ambienti dell'abitazione nel periodo di monitoraggio (01/11/2017 – 31/03/2018)

Il grado di copertura del data-set relativo ai diversi ambienti è misurato come percentuale di valori quarti orari presenti nel data-set sulla totalità dei record che si sarebbero dovuti registrare in ciascun ambiente, prima e dopo la rimozione degli *outlier*.

**Tabella 8** numero record e % di copertura sul periodo di monitoraggio per i diversi ambienti dell'abitazione nel PERIODO INVERNALE (01/11/2017 – 31/03/2018)

Ambiente	N. record data-set		% copertura		Riduzione % copertura*	
	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.	Temp.	U.R.
Salotto	4462	4462	38%	38%	-1,35%	-0,06%
Cucina	3406	3406	29%	29%	-1,64%	-0,77%

\* dovuta alla rimozione degli *outliers*, identificati tramite il metodo del *box plot*.

Come si può osservare dai grafici e dalle tabelle sovrastanti, il data-set garantisce una scarsa copertura rispetto alla totalità del periodo di riscaldamento, mediamente del 34%, e, nei periodi coperti, non c'è altissima continuità, infatti nessuna giornata, per nessuno dei due ambienti, presenta un database quarti orario assolutamente completo.

Nello specifico, nell'intero periodo invernale (01/11/2017 – 31/03/2018), rispetto al quale i grafici e le tabelle sovrastanti mirano a descrivere la copertura garantita dal data-set a valle della rimozione degli *outlier*, i dati

quarti orari di temperatura e umidità relativa si riferiscono al periodo 17/12/2017 – 17/03/2018, con delle interruzioni tra il 15 e il 25 gennaio e tra l'8 e il 17 marzo. Considerando sia il periodo estivo che quello invernale (274 giornate), la Tabella 9 mostra il numero di giornate per le quali vi sia una copertura almeno superiore alle 5 ore sia per il dato di temperatura che di umidità per i diversi ambienti e la percentuale di copertura giornaliera media.

**Tabella 9** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Salotto		Cucina	
	n.	%	n.	%
Luglio	0	n.a.	0	n.a.
Agosto	0	n.a.	0	n.a.
Settembre	0	n.a.	0	n.a.
Ottobre	0	n.a.	0	n.a.
Novembre	0	n.a.	0	n.a.
Dicembre	13	77%	11	74%
Gennaio	21	72%	14	59%
Febbraio	18	79%	18	62%
Marzo	9	61%	9	55%
	<b>61</b>	<b>72%</b>	<b>52</b>	<b>63%</b>

In conclusione, per 52 giornate del periodo invernale i dati quarti orari di temperatura e umidità relativa sono presenti per entrambi gli ambienti monitorati per un numero di ore superiore a cinque, con una percentuale di copertura media giornaliera del 74% per il dato di temperatura e del 63% per quello di umidità relativa. Esse rappresentano dunque il limite temporale entro il quale sono state svolte le analisi successivamente illustrate. Poiché, come si può osservare dai grafici sovrastanti, la maggior parte dei buchi giornalieri nel data-set occorrono di notte, le analisi svolte relativamente agli andamenti dei due parametri sono state condotte restringendo ulteriormente il campione delle giornate a quelle aventi copertura anche notturna e in modo che fossero coincidenti con quelle analizzate negli altri due casi pilota. Tali analisi sono riferite in Sezione 3.1.

- C2017 – parametri ambientali

Anche per i casi pilota C2017 è stata condotta un'analisi volta a verificare la qualità del data-set a disposizione, similmente a quanto fatto per E2016. In particolare, è stata valutata la qualità dei dati di temperatura interna misurata, unico parametro psicrometrico misurato in C2017.

Questo studio ha consentito di preparare un robusto database, e di selezionare i periodi e gli ambienti da analizzare. In particolare, la scelta è stata condotta sulla base della continuità e significatività dei dati disponibili. In questa fase l'appartamento C10 è stato escluso dalle successive analisi per via di problemi di comunicazione del sistema di monitoraggio. Di seguito viene riassunto per punti il processo di analisi ed elaborazione del data-set per i casi pilota C1-C9.

1. Identificazione degli *outlier*;
2. Calcolo di indicatori statistici descrittivi del data-set: percentuale di record presenti nel periodo;
3. Eliminazione delle giornate non significate (aventi un numero molto limitato di *record*);
4. Calcolo di indicatori statistici descrittivi del data-set: percentuale di record medi giornalieri;
5. Visualizzazione degli andamenti della serie di dati.

Tale analisi è stata condotta per il dato di temperatura interna per ciascun ambiente delle nove abitazioni, rilevando una incompletezza del data-set. In particolare, per il periodo di monitoraggio (dal 14/04/2018 al 31/08/2018), è stato tracciato un *box plot*, rappresentante la distribuzione dei record di tale parametro, al fine di rilevare la presenza di eventuali *outlier* nel data-set, definiti come valori statisticamente anomali, in quanto distanti più di una volta e mezzo dell'interquartile dal primo quartile (inferiori) e dal terzo (superiori).

Tali valori, risultati spesso presenti, sono stati eliminati dal data-set. In questo modo esso è stato meglio caratterizzato. Per giudicare la qualità e la rappresentatività del database così preparato, si è passati ad osservare il livello di copertura mensile (numero di giornate aventi più di 20 record) e giornaliero (% di record presenti rispetto a quelli che si sarebbero dovuti registrare in una giornata, cioè 4 all'ora) da esso garantito, ambiente per ambiente, nell'arco dell'intero periodo di monitoraggio. Le tabelle seguenti (Tabella 10 - Tabella 18) mostrano tali indicatori per ciascun ambiente di ciascuna abitazione, mese per mese.

○ **C1** – parametri ambientali

**Tabella 10** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Soggiorno		Letto 2		Bagno		Letto		Disimpegno	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Aprile	17	100%	17	100%	17	100%	17	100%	14	100%
Maggio	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%
Giugno	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%
Luglio	27	100%	27	100%	26	100%	27	100%	27	100%
Agosto	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
	<b>105</b>	<b>100%</b>	<b>105</b>	<b>100%</b>	<b>104</b>	<b>100%</b>	<b>105</b>	<b>100%</b>	<b>102</b>	<b>100%</b>

○ **C2** – parametri ambientali

**Tabella 11** numero di giornate con più 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Soggiorno1		Soggiorno2		Bagno		Bagno2		Letto2		Letto		Cucina	
	n.	%	n.	% G	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Aprile	16	99%	16	99%	16	99%	16	99%	16	100%	16	100%	16	99%
Maggio	31	100%	31	100%	31	100%	31	96%	31	100%	31	100%	30	100%
Giugno	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%
Luglio	2	54%	1	22%	0	n.a.	0	n.a.	1	26%	12	35%	0	n.a.
Agosto	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
	<b>79</b>	<b>100%</b>	<b>78</b>	<b>100%</b>	<b>77</b>	<b>81%</b>	<b>77</b>	<b>82%</b>	<b>78</b>	<b>100%</b>	<b>89</b>	<b>100%</b>	<b>76</b>	<b>100%</b>

○ **C3** – parametri ambientali

**Tabella 12** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Soggiorno		Letto		Cucina		Bagno		Letto2		Disimpegno	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Aprile	17	97%	17	97%	17	97%	17	97%	17	97%	17	97%
Maggio	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%
Giugno	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%
Luglio	29	45%	29	37%	30	41%	29	40%	29	38%	29	45%
Agosto	29	28%	29	26%	29	28%	28	26%	29	26%	29	27%
	<b>107</b>	<b>86%</b>	<b>107</b>	<b>84%</b>	<b>108</b>	<b>85%</b>	<b>107</b>	<b>84%</b>	<b>107</b>	<b>84%</b>	<b>106</b>	<b>86%</b>

○ **C4** – parametri ambientali

**Tabella 13** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Soggiorno		Letto		Cucina		Bagno	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Aprile	3	51%	3	51%	3	51%	3	51%



Maggio	22	79%	22	79%	22	79%	22	79%
Giugno	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%
Luglio	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
Agosto	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
	<b>55</b>	<b>77%</b>	<b>55</b>	<b>77%</b>	<b>55</b>	<b>77%</b>	<b>55</b>	<b>77%</b>

○ C5 – parametri ambientali

**Tabella 14** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Soggiorno		Cucina		Letto		Letto 2		Bagno	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Aprile	17	100%	17	100%	17	100%	17	100%	17	100%
Maggio	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%
Giugno	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%
Luglio	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
Agosto	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
	<b>78</b>	<b>100%</b>	<b>78</b>	<b>100%</b>	<b>78</b>	<b>100%</b>	<b>78</b>	<b>100%</b>	<b>78</b>	<b>100%</b>

○ C6 – parametri ambientali

**Tabella 15** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Soggiorno1		Soggiorno2		Camera		Letto		Bagno2		Bagno	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Aprile	17	100%	17	100%	17	100%	17	100%	17	100%	17	100%
Maggio	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%
Giugno	13	100%	13	100%	13	100%	13	100%	13	100%	13	100%
Luglio	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
Agosto	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
	<b>61</b>	<b>100%</b>	<b>61</b>	<b>100%</b>	<b>61</b>	<b>100%</b>	<b>61</b>	<b>100%</b>	<b>61</b>	<b>100%</b>	<b>61</b>	<b>100%</b>

○ C7 – parametri ambientali

**Tabella 16** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Soggiorno		Letto2		Letto		Bagno	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Aprile	17	100%	17	100%	17	100%	17	100%
Maggio	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%
Giugno	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%
Luglio	30	49%	30	49%	30	49%	30	49%
Agosto	1	24%	0	n.a.	3	46%	1	36%
	<b>108</b>	<b>88%</b>	<b>108</b>	<b>88%</b>	<b>108</b>	<b>88%</b>	<b>108</b>	<b>88%</b>

○ C8 – parametri ambientali

**Tabella 17** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Soggiorno		Letto2		Letto		Bagno	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Aprile	17	100%	17	100%	17	100%	17	100%

<i>Maggio</i>	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%
<i>Giugno</i>	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%
<i>Luglio</i>	31	52%	31	52%	31	52%	31	52%
<i>Agosto</i>	2	0%	3	0%	3	0%	2	0%
	<b>111</b>	<b>88%</b>	<b>112</b>	<b>88%</b>	<b>112</b>	<b>88%</b>	<b>111</b>	<b>88%</b>

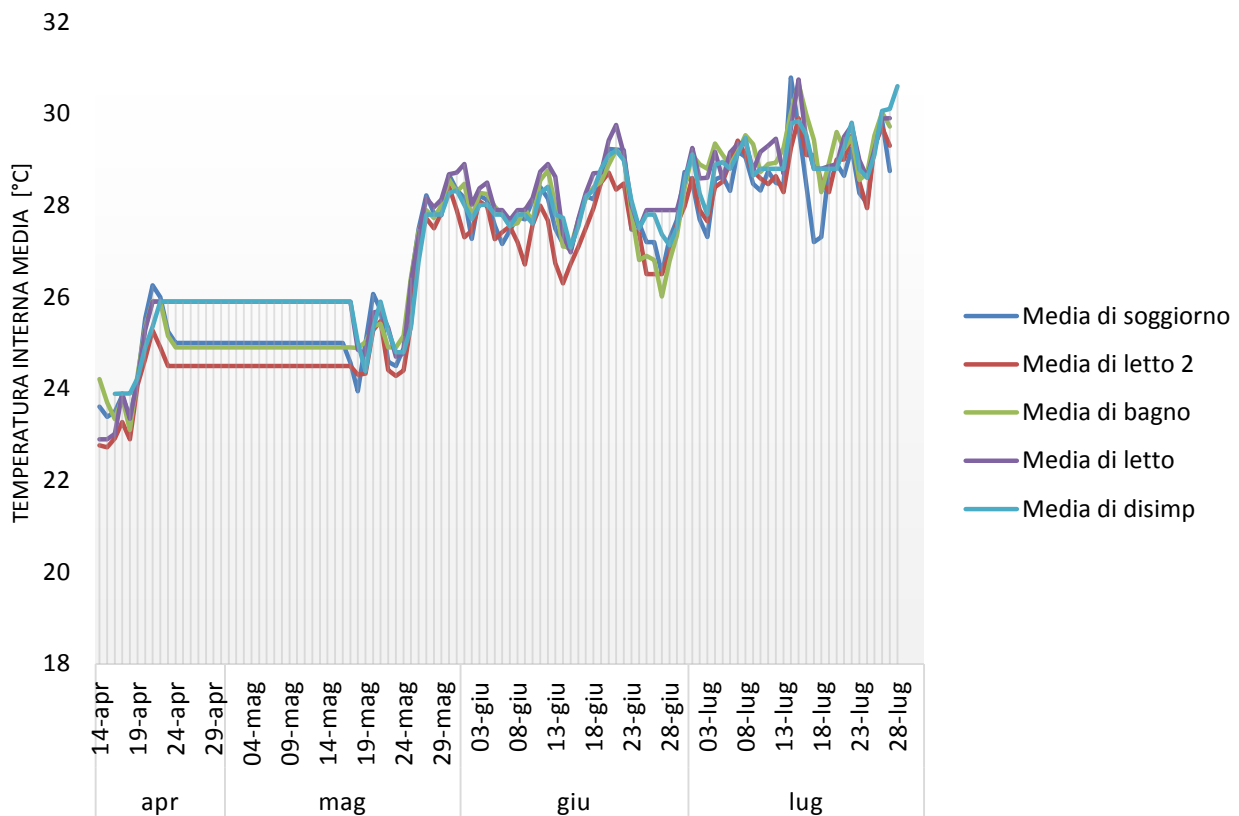
o C9 – parametri ambientali

**Tabella 18** numero di giornate con più di 20 record e, se presenti, loro copertura giornaliera media (% di record presenti su 24h) per i diversi ambienti nei mesi di monitoraggio.

giornate	Soggiorno1		Letto1		Cucina		Letto2		Letto3		Bagno		Bagno2	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
<i>Aprile</i>	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
<i>Maggio</i>	23	98%	23	98%	23	98%	23	98%	23	98%	23	98%	23	98%
<i>Giugno</i>	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%	30	100%
<i>Luglio</i>	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
<i>Agosto</i>	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
	<b>53</b>	<b>99%</b>	<b>53</b>	<b>99%</b>	<b>53</b>	<b>99%</b>	<b>53</b>	<b>99%</b>	<b>53</b>	<b>99%</b>	<b>53</b>	<b>99%</b>	<b>53</b>	<b>99%</b>

Come si può osservare dalle tabelle sovrastanti, 6 abitazioni di 9 hanno un database completo nei due mesi centrali del monitoraggio (maggio e giugno), mentre solo 4 sono caratterizzate da un database che includa un numero di giornate significativo per il mese di luglio, dal momento che in 4 casi su 6 il database si interrompe con il mese di giugno, e nel caso restante il numero di giornate per le quali vi siano dei dati è assolutamente insufficiente a caratterizzare l'ambiente. In 7 casi su 9 il database include le giornate di aprile, corrispondenti alla fase iniziale del monitoraggio.

La copertura giornaliera per le giornate presenti nel database è generalmente sempre buona. Tuttavia, da un'analisi caso per caso emergono delle problematiche di acquisizione che da soli gli indicatori statistici fino a qui impiegati non hanno rilevato e che emergono solo dalla lettura degli andamenti del parametro di temperatura. Infatti, dall'esame visivo degli andamenti di temperatura interna media giornaliera dei diversi ambienti, emerge come occorrono degli *slot* temporali lunghi anche alcune giornate nei quali il dato di temperatura resta costante.



**Figura 4** andamento temperatura interna media giornaliera nei diversi ambienti del caso pilota C1.

Come si può vedere dal grafico sovrastante (Figura 4), riportato a titolo esemplificativo per uno dei casi pilota di C2017, da metà aprile a metà maggio tutti gli ambienti presentano un dato di temperatura costante. Tale dato non può essere considerato valido, essendo probabilmente frutto di un mal funzionamento del sistema di monitoraggio. Dunque, l'elevato indice di copertura giornaliera è insufficiente a dimostrare la qualità del data-set, in quanto si tratta di una copertura fittizia. Il processo di scansione di queste anomalie è risultato nella necessità di escludere alcune abitazioni ed alcuni ambienti dall'analisi.

In particolare, i data-set dei casi pilota C4, C5, C6 e C9 presentavano così spesso questo fenomeno che, unito alla mancanza di continuità e ad una copertura giornaliera media inferiore agli altri casi pilota, è stata necessaria la loro esclusione dalle successive analisi. L'osservazione su base giornaliera degli andamenti di temperatura media oraria dei casi pilota C1, C2, C3, C7 e C8, ha consentito di rilevare simili anomalie anche nel dato medio orario, il quale si manteneva costante per l'intera giornata osservata. I dati relativi a queste giornate non possono essere considerati validi. Per ricercare la presenza di questo fenomeno al livello giornaliero è stata calcolata la deviazione standard dei dati quarti orari rispetto alla media giornaliera. Le giornate aventi deviazione standard pari a zero sono state escluse dall'analisi, in quanto aventi dato costante sull'intera giornata, fenomeno interpretato come un'anomalia del sistema di monitoraggio facente sì che la giornata non fosse significativa ai fini delle analisi. A valle di questo processo di verifica ed elaborazione dei data-set, la loro continuità settimanale, per tutti gli ambienti, è risultata compromessa. Di conseguenza si è scelto di concentrare le successive analisi su giornate tipo, analizzando di esse gli andamenti di temperatura media oraria per diversi ambienti. Gli ambienti che sono stati presi in considerazione sono stati quelli nei quali fosse presente un impianto di climatizzazione (*split* o *multisplit*). Infatti, essendo l'obiettivo quello di descrivere la qualità termica delle abitazioni tramite la relazione del dato di temperatura con i limiti raccomandati per garantire il comfort, si è scelto di focalizzarsi su quegli ambienti nei quali l'utente possa controllare attivamente la temperatura tramite l'accensione dell'impianto, rendendo possibile la discussione della loro preferenza termica e della capacità del sistema di soddisfarla.

Le analisi successivamente condotte e riferite in Sezione 3.2, si sono dunque concentrate sulle abitazioni C1, C3 e C7, delle quali sono stati analizzati sia gli andamenti delle temperature interne medie orarie per gli

ambienti caratterizzati dalla possibilità di controllo da parte degli utenti (cioè ambienti dotati di sistemi *split*), messi in relazione con il dato di temperatura esterna media oraria e di consumo medio orario per la climatizzazione; sia la frequenza con la quale il parametro di temperatura interna media rispetta certe condizioni, calcolato il suo valore medio giornaliero. Tali analisi sono riferite in Sezione 3.2.

- E2016 e C2017 – consumi totali

Parte dell'analisi riferita nel presente report ha riguardato i consumi per la climatizzazione, sia invernale che estiva, ai quali ci si è riferiti per ricercare possibili correlazioni con alcuni parametri ambientali (sia interni che esterni) al fine di individuare delle metodologie utili a spiegare il comportamento degli edifici e, dunque, ad ottimizzarlo.

Mentre i consumi per la climatizzazione estiva sono oggetto di monitoraggio nelle abitazioni aventi questo servizio (C1, C3, C5, C6, C7, C9 e C10), i consumi relativi agli altri servizi sono collezionati per vettore energetico (gas, pellet, legna, energia elettrica). Tali dati hanno prevalentemente origine da bollette mensili riferite all'anno 2017 (per C2017) o sono frutto di loro stime annuali relative all'anno 2015 (per E2016). Tali dati sono stati preparati per essere efficacemente impiegati per descrivere il comportamento del sistema. In questa fase si sono riscontrate due difficoltà. Prima di tutto, i dati da bolletta non erano disponibili per l'abitazione C2, per cui si è fatto ricorso a dati simulati forniti da ENEA; in secondo luogo, le abitazioni E8 ed E9 non hanno contabilizzazione separata, perciò sono state considerate insieme, e al loro dato di consumo da bolletta sono stati aggiunti anche i consumi di legna e pellet che alimentano dei termo-camini che integrano il servizio di riscaldamento durante la stagione invernale. Questo è stato fatto a partire dal dato dichiarato da ENEA di kilogrammi consumati nel 2015. In generale, la preparazione del data-set costituito dalle bollette ha previsto la loro collezione e la definizione della scala temporale rispetto alla quale aggregare i consumi, individuata nel mese, per la descrizione del comportamento dell'edificio tramite la tecnica della firma energetica, e nell'anno, per il calcolo dei relativi indicatori di *performance*. Entrambe le analisi sono riferite in Sezione 5.

- C2017 – Potenza elettrica assorbita dai condizionatori

Per quanto riguarda i casi pilota C2017, le analisi condotte hanno riguardato anche i dati di consumo elettrico, i quali sono stati soggetti anch'essi a una fase preliminare di pre-processamento e pulizia, per isolare dati utili alle analisi e periodi a cui riferirsi per ognuno degli edifici.

In prima battuta sono stati selezionati i dati degli edifici che hanno impianti di climatizzazione installati e monitorati, in modo da poter utilizzare i dati di consumo riconducibili all'utilizzo di queste apparecchiature. Infatti, sono stati eliminati i dati degli edifici C2, C4 poiché non è stato possibile monitorare i condizionatori d'aria presenti, dell'edificio C8 poiché non ha condizionatori installati, mentre quelli dell'edificio C10 a causa di problemi di comunicazione del sistema di monitoraggio.

I dati sono stati poi filtrati in modo tale da eliminare valori che risultavano fuori dal *range* possibile dei dati di consumo elettrico residenziale, quindi sono stati eliminati i valori di assorbimento negativo o superiore a 3300 W. Per il limite superiore di questo range di accettabilità è stato scelto il valore di potenza disponibile per una comune utenza residenziale, in modo da eliminare valori di assorbimento che non potrebbero essere monitorati e che risultano quindi da errori di misura. Come limite inferiore per i valori di assorbimento è stato scelto lo zero, poiché non sono considerati possibili assorbimenti elettrici negativi.

Di seguito viene riassunta la procedura applicata per la preparazione del dataset e la sua analisi per i casi pilota C1, C3, C5, C6, C7, C9.

1. Selezione del periodo di utilizzo degli impianti di climatizzazione, sulla base della prima occorrenza di un assorbimento elettrico dei condizionatori presenti.
2. Eliminazione dei valori che cadono fuori dal *range* di assorbimento elettrico accettabile per una utenza residenziale (minori di zero o superiori a 3300 W)
3. Visualizzazione dei dati aggregati agli assorbimenti medi orari o ai consumi giornalieri.

Tramite questa procedura è stato possibile ottenere dei dati che potessero fornire risultati significativi a valle di analisi di estrazione di conoscenza automatica tramite tecniche di *Data Analytics*.

Le analisi sono state condotte su tutti gli edifici in parallelo, nonostante l'utilizzo dei condizionatori non ha la stessa frequenza in ogni edificio, dunque la disponibilità di dati risulta diversa. In questo modo, si è potuto fare un confronto degli edifici non solo in termini di correlazione tra temperatura interna e consumo legato ai condizionatori, ma anche in base ai risultati ottenuti sulla base della quantità di dati utilizzati.

### 3 Analisi della qualità termo-igrometrica degli ambienti interni

#### 3.1 Edifici E2016 – Aggregatore 1

L'analisi condotta è relativa al monitoraggio (corrispondente a parte del periodo estivo 2017 e parte del periodo di riscaldamento 2017-2018) di tre abitazioni appartenenti al gruppo E2016, ubicate nel Comune di Roma (zona climatica D) e ha interessato i dati monitorati di temperatura interna e umidità relativa di alcuni loro ambienti, con l'obiettivo di descriverne la qualità termo-igrometrica.

La norma UNI EN ISO 7730 [2], permette di definire i requisiti di benessere termico per il periodo di riscaldamento e per quello di raffrescamento, fissando i parametri ambientali raccomandati in termini di temperatura e umidità relativa, oltre che di altri fattori ambientali e soggettivi. La raccomandazione di base è che la percentuale di insoddisfatti (PPD) sia inferiore al 10%, dato che corrisponde ad un voto medio previsto (PMV) compreso tra -0,5 e +0,5, rappresentante la neutralità termica percepita dagli occupanti un ambiente.

Per il periodo invernale, che in zona climatica D va dal 1° novembre al 15 aprile (da DPR 412/93), in caso di attività sedentaria o leggera (tipica delle abitazioni) e con abbigliamento coerente alle stagioni, i requisiti che la norma UNI EN ISO 7730 fissa per questi due parametri, al fine del raggiungimento dei valori di PPD e PMV di cui sopra, sono i seguenti [2]:

- Temperatura interna: 20 °C – 24 °C (per esempio 22 °C +/- 2 °C);
- Umidità relativa: 30 % - 70 %

mentre per il periodo estivo i requisiti sono [2]:

- Temperatura interna: 23 °C – 26 °C (per esempio 24,5 °C +/- 1,5 °C);
- Umidità relativa: 30 % - 70 %

Si segnala che, al di là delle indicazioni sul comfort termo-igrometrico della UNI 7730, il DPR 412/93 impone che la temperatura interna delle abitazioni sia pari a 20°C + 2°C per tutta la stagione di accensione degli impianti di riscaldamento.

Le analisi condotte sugli ambienti individuati a valle dall'attività di preparazione del data-set riferita nella precedente sezione (sezione 2.1) hanno portato all'elaborazione delle seguenti rappresentazioni statistiche:

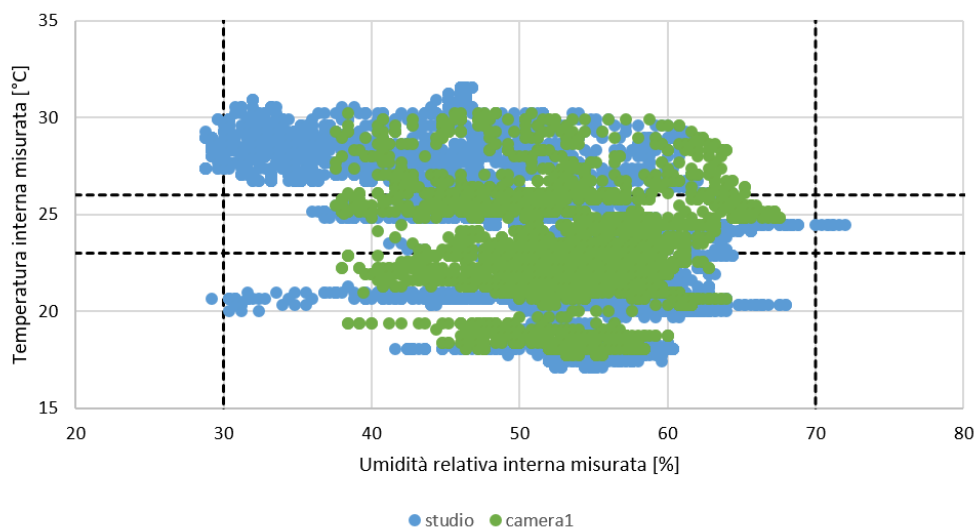
- matrice temperatura-umidità relativa dei dati quarti orari per alcuni ambienti per l'intero periodo monitorato disponibile;
- distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera;
- grafici di andamento di temperatura media oraria per alcuni ambienti per giorni tipo, messi in relazione al dato di temperatura esterna media oraria.

Sulla base di queste rappresentazioni è stata descritta la qualità termo-igrometrica degli ambienti analizzati attraverso la relazione tra i parametri ambientali e i requisiti normativi di qualità ambientale. Le possibili correlazioni dei parametri ambientali con le caratteristiche del sistema (esposizione e inerzia) e con la tipologia di occupazione (preferenza termica e frequenza di interazione con il sistema) sono state discusse, evidenziando la potenzialità d'uso degli strumenti statistici individuati nel descrivere il comportamento del sistema edificio-impianto-occupante. Nei grafici seguenti "n" il numero di record sulla base dei quali essi sono stati tracciati.



E8

Matrice UR-T\_periodo estivo

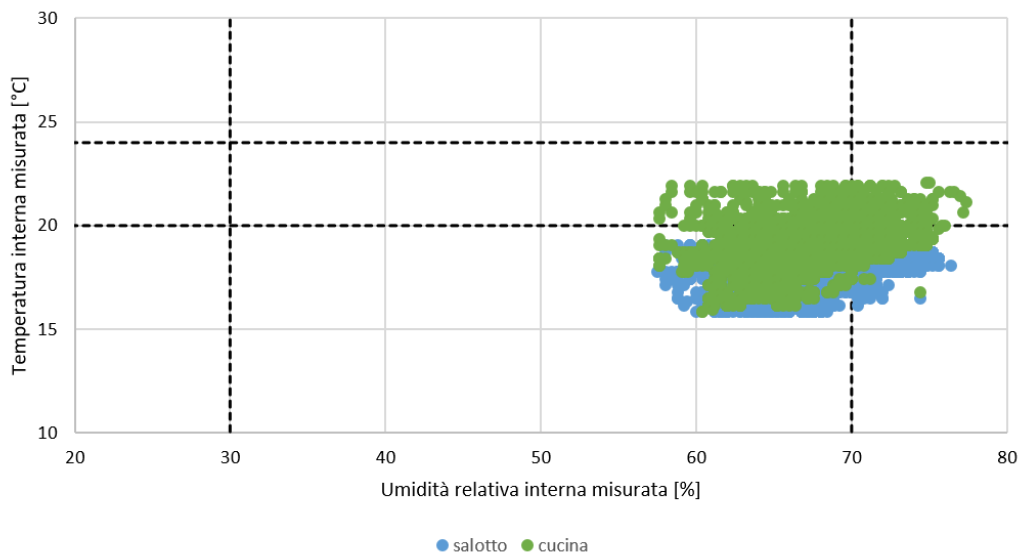


n(studio) = 7871; n(camera1) = 4597

Figura 5 Qualità termo-igrometrica di studio e camera. Distribuzione dei dati quarti orari (n) di temperatura e umidità relativa per l'intero periodo estivo.

E8

Matrice UR-T\_periodo invernale

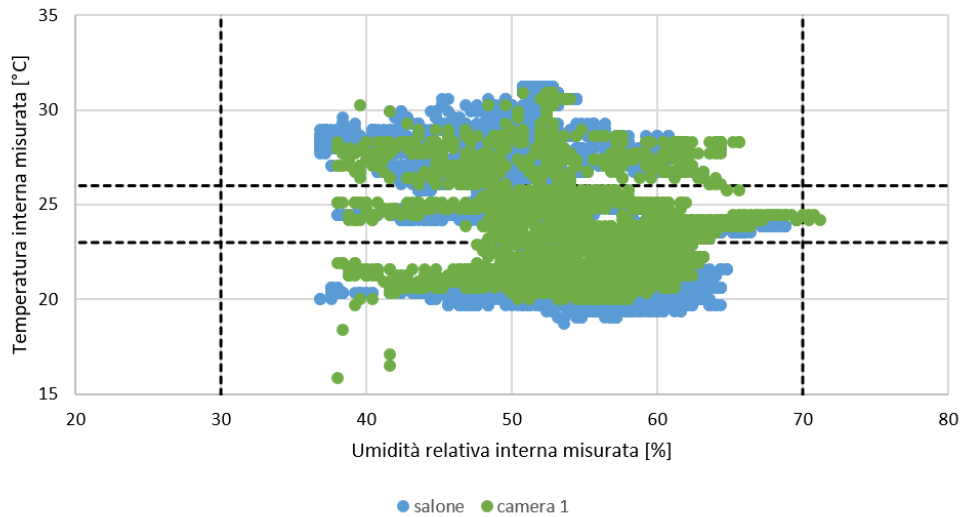


n(studio) = 10544; n(camera1) = 7457

Figura 6 Qualità termo-igrometrica di studio e camera. Distribuzione dei dati quarti orari (n) di temperatura e umidità relativa per l'intero periodo invernale.

**E9**

Matrice UR-T\_periodo estivo

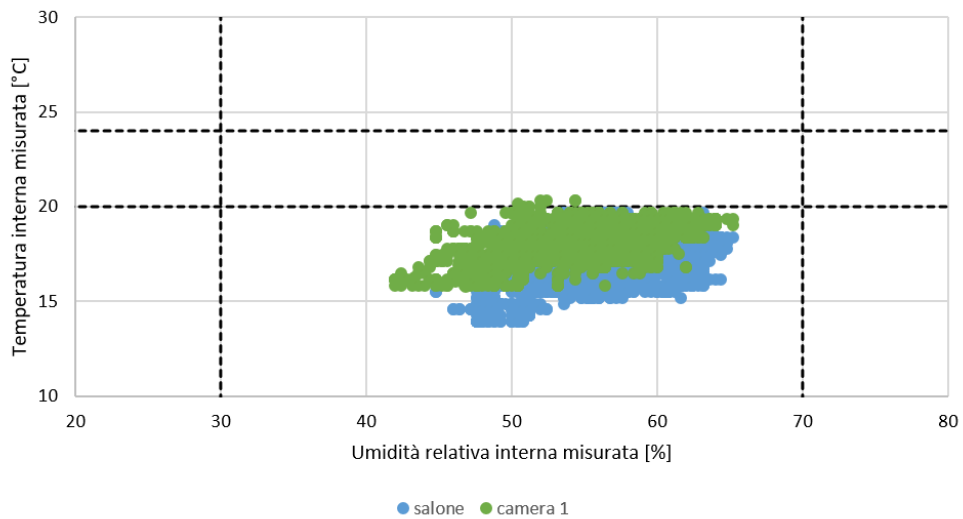


n(studio) = 8739; n(camera1) = 4883

**Figura 7** Qualità termo-igrometrica di salone e camera1. Distribuzione dei dati quarti orari (n) di temperatura e umidità relativa per l'intero periodo estivo.

**E9**

Matrice UR-T\_periodo invernale

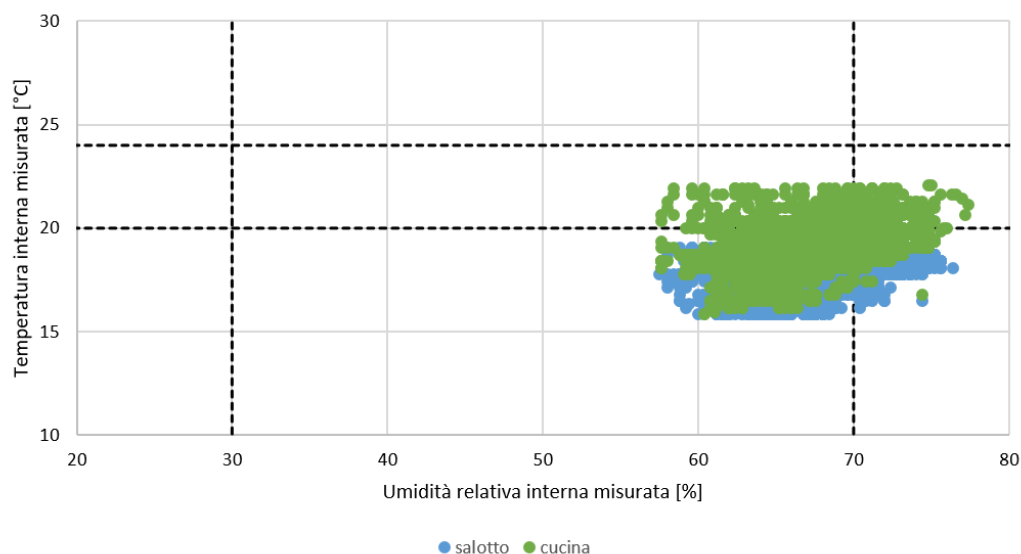


n(studio) = 1988; n(camera1) = 1512

**Figura 8** Qualità termo-igrometrica di salone e camera1. Distribuzione dei dati quarti orari (n) di temperatura e umidità relativa per l'intero periodo invernale.

### E3

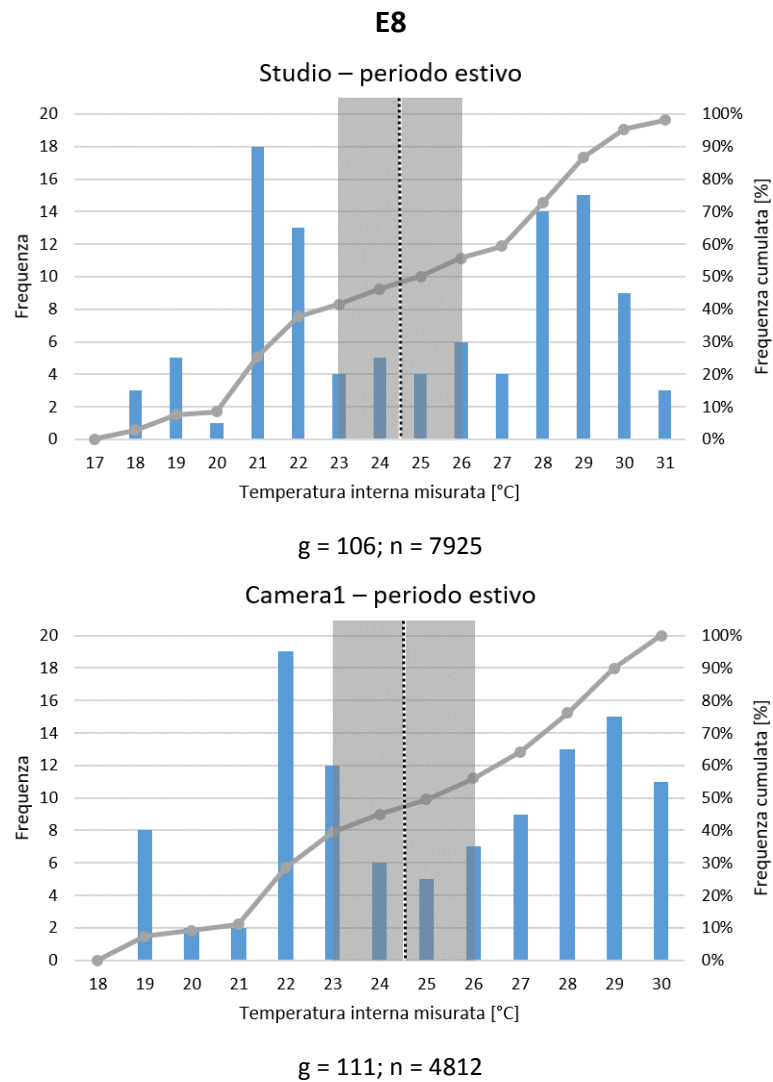
#### Matrice UR-T\_periodo invernale



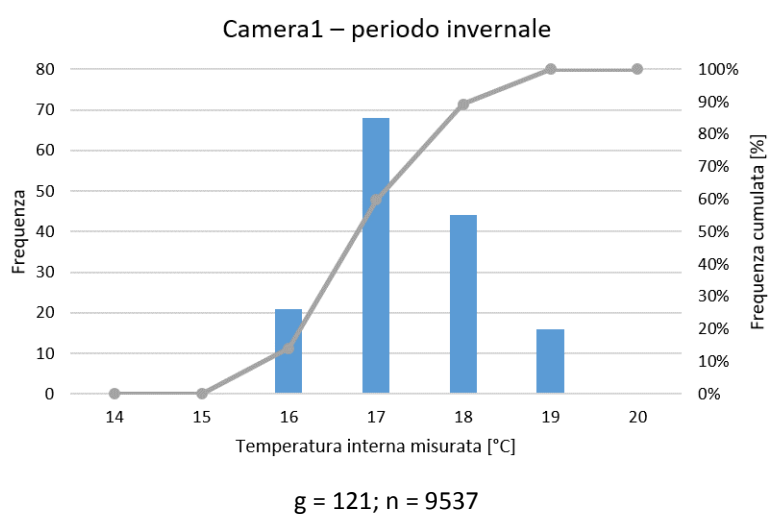
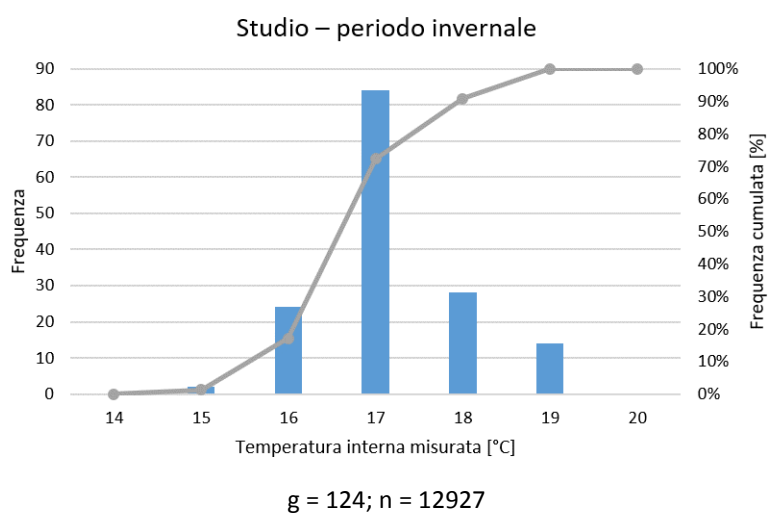
n(studio) = 4296; n(camera1) = 3171

**Figura 9** Qualità termo-igrometrica di salotto e cucina. Distribuzione dei dati quarti orari (n) di temperatura e umidità relativa per l'intero periodo invernale.

Nei grafici sovrastanti (Figura 5 - Figura 9) si osservano le distribuzioni dei dati quarti orari di temperatura e umidità relativa per due stanze rispettivamente nel periodo estivo ed invernale nelle tre abitazioni E2016. Dunque, ciascun punto rappresenta le caratteristiche dell'aria interna in termini di temperatura e umidità relativa occorse in ciascuna finestra temporale registrata (quarto d'ora). Le linee tratteggiate individuano i limiti definiti tramite UNI EN ISO 7730 per i due parametri ambientali. Si osserva dunque che, mentre le condizioni di umidità relativa sono buone, il dato di temperatura risulta spesso al di fuori del *range* raccomandato. Tale parametro è dunque stato studiato in termini di distribuzione di frequenza, calcolata la media giornaliera, e di andamento, calcolate le medie orarie per giornate tipo. Tali analisi, riportate di seguito, sono state condotte separatamente per il periodo estivo e quello invernale. Nei grafici seguenti "g" indica il numero di giornate e "n" il numero di record sulla base dei quali essi sono stati tracciati.

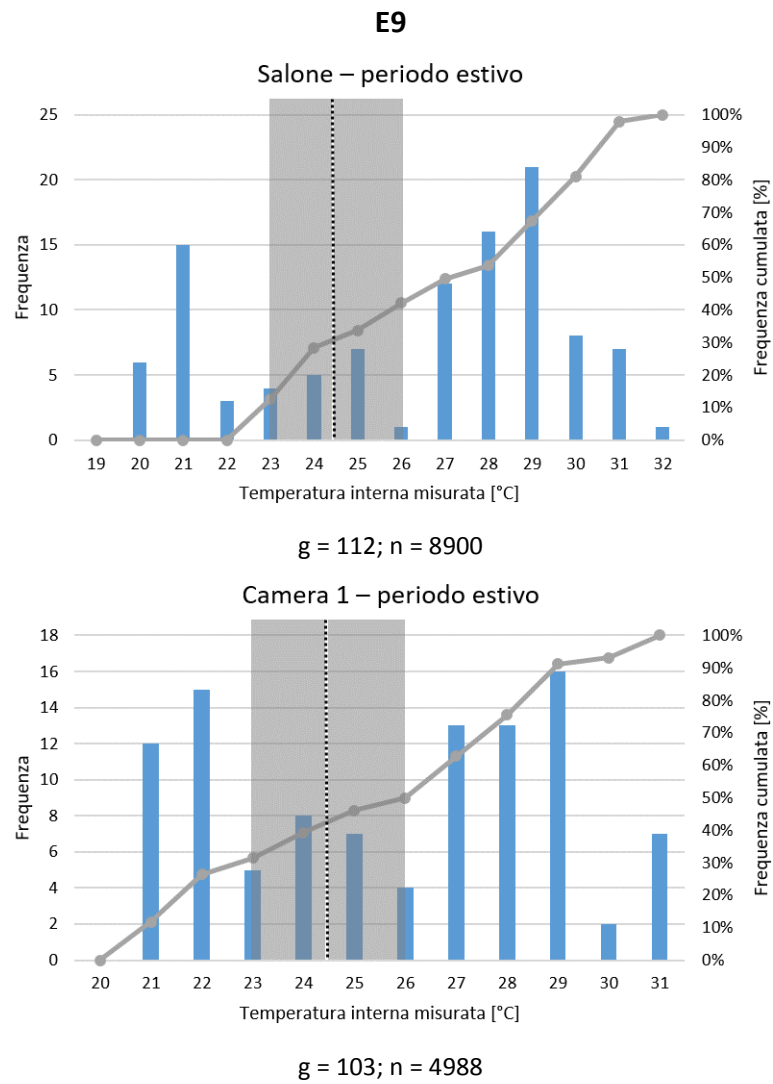


**Figura 10** Temperatura di studio e camera1 calcolata su n record in periodo estivo. Distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera per giornate disponibili (g).

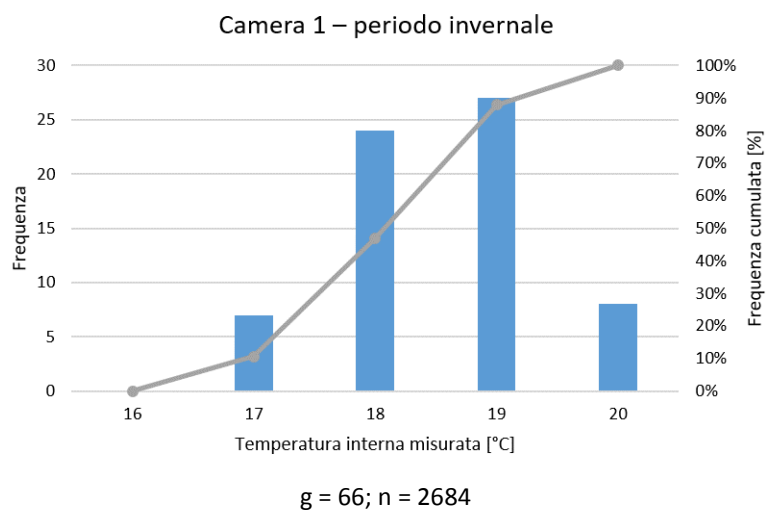
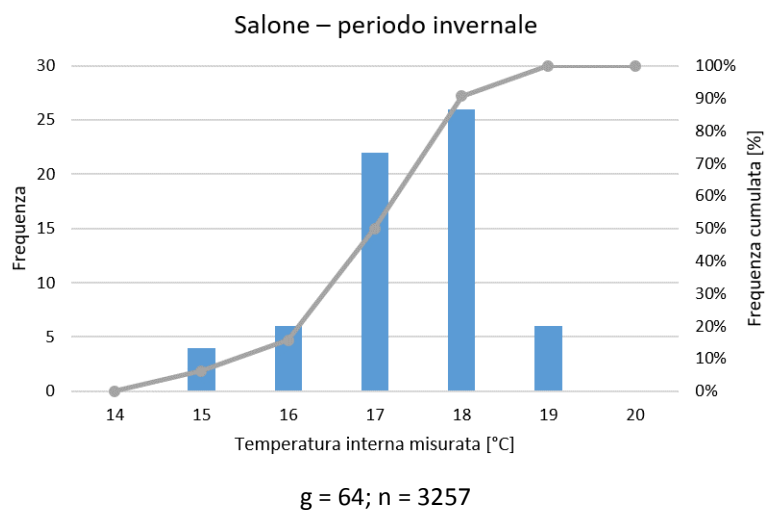


**Figura 11** Temperatura di studio e camera1 calcolata su n record in periodo invernale. Distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera per giornate disponibili (g).

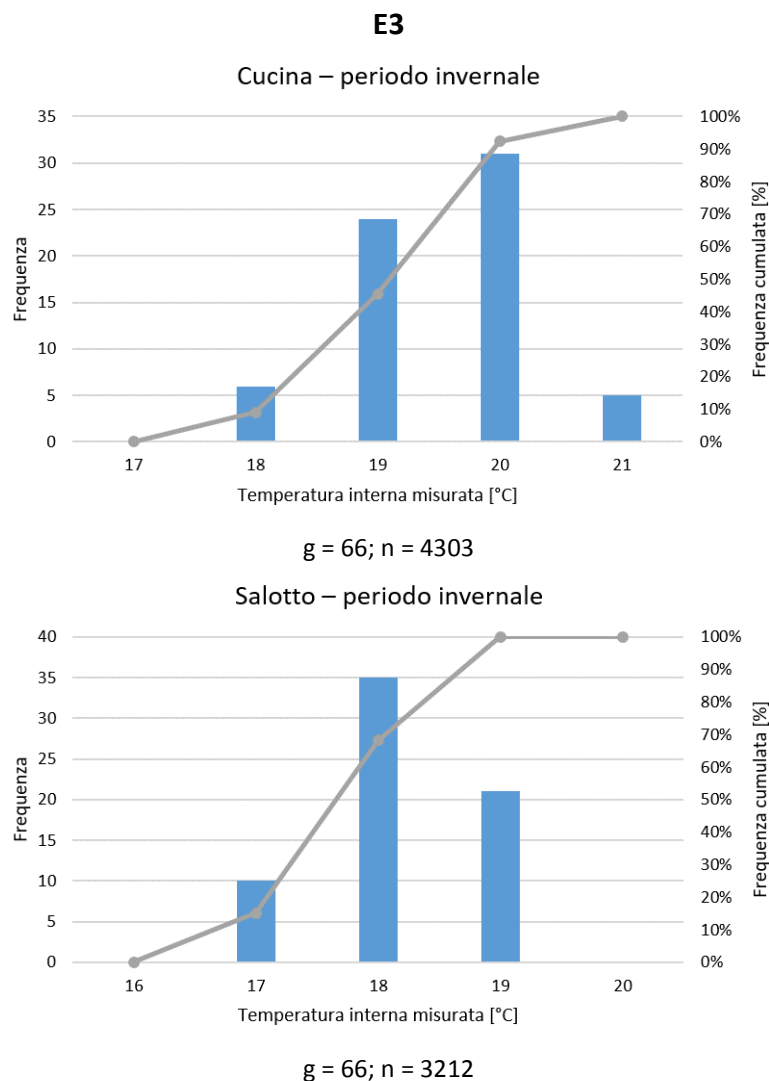




**Figura 12** Temperatura di salone e camera1 calcolata su n record in periodo estivo. Distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera per giornate disponibili (g).



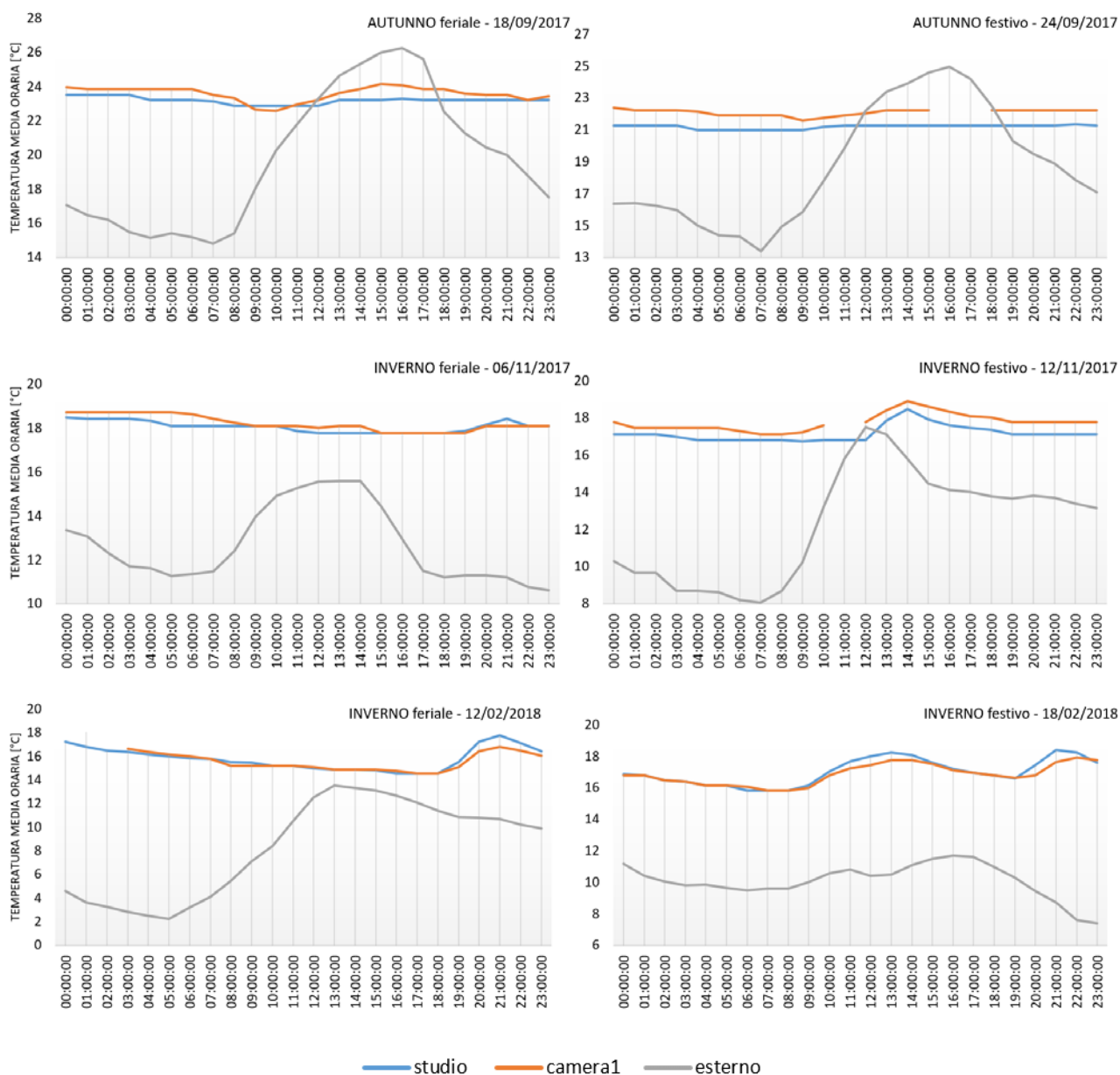
**Figura 13** Temperatura di salone e camera1 calcolata su n record in periodo invernale. Distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera per giornate disponibili (g).



**Figura 14** Temperatura di salotto e cucina calcolata su n record in periodo invernale. Distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera per giornate disponibili (g).

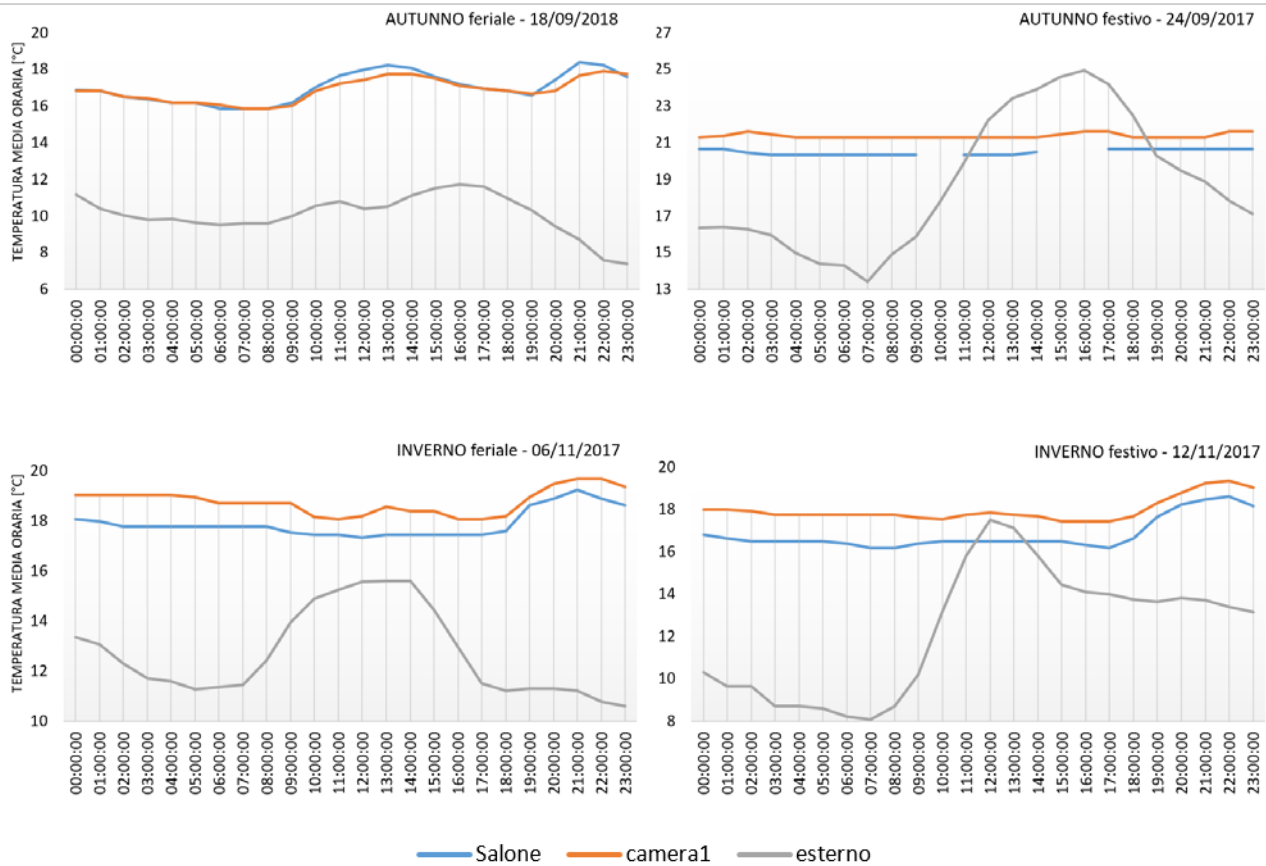
Come si può osservare nei grafici sovrastanti, le temperature interne medie giornaliere nei diversi ambienti delle abitazioni E2016 sono sempre (100% dei casi) al di sotto del limite definito da UNI EN 7730 di 22°C nel periodo invernale (Figura 11, Figura 13, Figura 14). In diversi ambienti la temperatura risulta anche inferiori ai 20°C previsti dal DPR 412/1993. Nel periodo estivo invece (Figura 10, Figura 12) la situazione è più eterogenea. In particolare, in E8, sia nello studio che nella camera, la temperatura media giornaliera è inferiore ai 26°C nel 56% dei casi, mentre solo nel 14% e 17% delle giornate, rispettivamente, le condizioni rientrano nel *range* 24,5°C +/- 1,5°C definito dalla stessa norma e campito in grigio nelle immagini. La situazione è diversa in E9, dove sia nel salone che nella camera la temperatura interna media giornaliera si trova in tale *range* per circa il 30% delle giornate. Ma per descrivere il comportamento del sistema in modo più rappresentativo, è opportuno riferirsi al dato medio orario, piuttosto che a quello medio giornaliero, il quale è influenzato dall'escursione notturna. Come anticipato (sezione 2.1), tale valutazione è stata possibile solo a livello di giornate tipo. Di seguito vengono riportati e discussi i risultati. Le serie di dati di temperatura interna sono state plottate con i dati di temperatura esterna misurati da stazioni climatiche limitrofe [4].

## E8



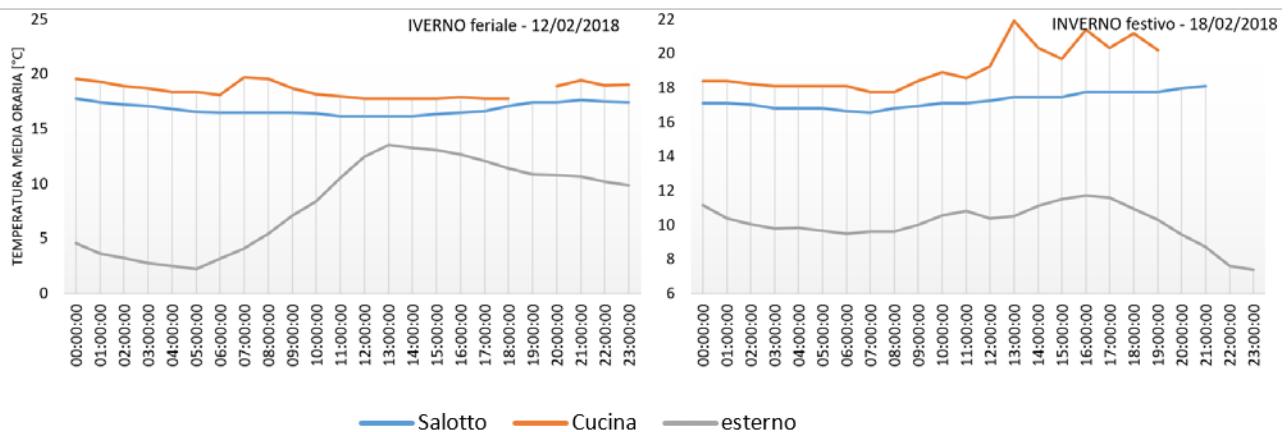
**Figura 15** Andamento delle temperature interne medie orarie per giornate tipo per studio e camera1 e relazione con la temperatura esterna.

**E9**



**Figura 16** Andamento delle temperature interne medie orarie per giornate tipo per salone e camera1 e relazione con la temperatura esterna.

**E3**



**Figura 17** Andamento delle temperature interne medie orarie per giornate tipo per salotto e cucina e relazione con la temperatura esterna.

Come si può osservare dai grafici sovrastanti (Figura 15 - Figura 17), in un giorno feriale del periodo **autunnale**, in E8, le temperature interne medie orarie si mantengono su valori intermedi tra quelli considerati ottimali per il comfort durante la stagione estiva (23 °C – 26 °C) e gli omologhi per la stagione invernale (20°C – 24°C) Tali valori risultano coerenti con la stagione e con i valori dell’ambiente esterno. Sia la notte che il pomeriggio la temperatura della camera è superiore di quella dello studio, mentre la mattina, quando le temperature nell’abitazione scendono, è la camera a raffrescarsi di più. Essendo l’impianto inattivo



in questa stagione, i dati sono da interpretarsi sulla base di due fattori influenzanti: l'esposizione e il comportamento dell'occupante. La camera, avente un affaccio a sud e uno a est, tende a aumentare di temperatura maggiormente durante le ore pomeridiane rispetto allo studio che ha un'unica finestra, più piccola di quelle della camera ed esposta ad est. Il comportamento notturno e mattutino dei due ambienti lascia intendere una preferenza degli utenti per una maggiore ventilazione della camera che dello studio, il quale la mattina subisce un'escursione termica minore.

Gli stessi due ambienti, in un giorno festivo, caratterizzato dalla presenza degli occupanti, tendono a avere un'escursione media giornaliera più bassa, pur rimanendo la camera più calda dello studio. Entrambi gli ambienti sono probabilmente mantenuti dagli utenti, tramite l'interazione con l'involucro, a quella che loro percepiscono come la temperatura di comfort, diversa nei due spazi adibiti a due usi diversi. In entrambi i casi tale temperatura è inferiore ai 23°C per l'intera giornata.

Negli stessi due giorni dell'anno, anche nell'abitazione E9 la camera tende ad essere più calda della zona giorno, in quanto quest'ultima è esposta a nord, mentre la zona notte a sud. L'escursione termica giornaliera non è molto elevata, al pari dell'abitazione sovrastante. In E9 le temperature tendono ad essere leggermente più basse rispetto ad E8, probabilmente anche per via di una sua minore esposizione, dato che la prima occupa il piano terra. Una sensibile diminuzione della temperatura interna della zona notte si registra all'incirca allo stesso orario tra le due abitazioni, indicando probabilmente una simile abitudine tra la coppia con un figlio che abita E8 e la coppia di pensionati occupante E9. Le due tipologie di abitanti sembrano avere la stessa preferenza termica per la zona notte, ma, a parità di esposizione, la camera di E9 tende a vedere un abbassamento delle temperature nell'arco del pomeriggio e fino alla sera più graduale, dato da interpretarsi come una maggiore frequenza di interazione degli occupanti con l'involucro degli edifici, essendo questi probabilmente più spesso a casa.

La frequenza di interazione con l'involucro al fine di soddisfare le proprie condizioni di comfort, fa sì che nei giorni festivi, nei quali verosimilmente sia gli abitanti di E8 che quelli di E9 sono a casa, la temperatura della zona giorno si mantenga piuttosto costante. Quella della coppia di pensionati resta più fresca anche per via dell'esposizione nord. Lo stesso fenomeno si registra in camera di questi ultimi, mentre la coppia di lavoratori preferisce abbattere le temperature della propria camera prima dei picchi del pomeriggio. La temperatura dello studio della coppia con bambino occupante l'abitazione E8 inizia a salire nelle prime ore della mattina, mentre la zona giorno dell'abitazione E9 mantiene la sua temperatura costante per l'intera mattina. Questo dato è da interpretare, più che come una preferenza termica sulla base della quale gli utenti interagiscono con gli ambienti, come dipendente dall'esposizione: lo studio, spostato a est, prende sole la mattina, mentre il salone, esposto a nord, non ha radiazione diretta e mantiene una temperatura interna più stabile.

In una giornata **invernale** feriale dei primi di novembre, i due ambienti analizzati di E8 hanno sempre una temperatura al di sotto di quella prescritta come minima dalla normativa (20 °C). Questo indica probabilmente la preferenza degli utenti per la non accensione dell'impianto di riscaldamento in questi due ambienti, dal momento che ci si trova ancora all'inizio del periodo di riscaldamento per la zona climatica D. Quanto appena affermato sembra vero all'esame delle ore mattutine, quando però l'abitazione non è occupata. Un controllo della temperatura sembra occorrere a partire dalle 18:00 nello studio e dalle 19:00 nella camera. L'escursione termica giornaliera è comunque piuttosto bassa, ad indicare probabilmente una scarsa ventilazione e un'accensione dell'impianto a delle temperature di set-point contenute.

Lo stesso può essere detto per l'abitazione E9, dove però la distanza di temperatura tra i due ambienti monitorati è maggiore, in quanto essi hanno esposizione opposta l'uno rispetto all'altro, mentre in E8 camera e studio sono adiacenti. Anche in E9, pur essendo la temperatura sempre al di sotto dei 20 °C raccomandati come limite di comfort, sembra occorrere un controllo della temperatura nelle ore serali, un'ora in anticipo rispetto ad E8. Le temperature alle quali i due ambienti vengono portate sono maggiori di quelle che usano preferire gli abitanti dell'abitazione sovrastante. In E9 però le temperature della zona giorno tendono ad abbassarsi di più rispetto agli ambienti monitorati in E8, richiedendo un maggiore carico sull'impianto al momento dell'accensione.

In E8 i dati relativi agli stessi due ambienti rilevano una preferenza termica degli occupanti nei giorni festivi differente rispetto ai giorni della settimana. L'unico innalzamento di temperatura avviene nelle ore più soleggiate della giornata, ad indicare che probabilmente non vi è stata nessuna attivazione dell'impianto.

L'andamento delle temperature in E9 nei giorni festivi è simile a quello adottato nei giorni feriali e conferma la preferenza per delle temperature leggermente più alte.

Nel momento più rigido dell'inverno non vi sono sufficienti dati per leggere il comportamento dell'abitazione E9, ma le abitazioni E3 (il cui database parte da dicembre) e la stessa E8, aventi stessa tipologia di occupazione (cioè coppia di lavoratori con bambino in età scolare), mostrano preferenze termiche differenti. Mentre in un giorno feriale di febbraio gli occupanti di E8 preferiscono lasciare calare le temperature interne della propria abitazione in entrambi gli ambienti monitorati (camera e studio) per poi riattivare l'impianto a partire dalle 18:00, quelli di E3 preferiscono lasciar calare leggermente le temperature del salotto fino alla riaccensione serale dell'impianto, ma prevedere due turni di accensione dell'impianto in cucina, uno la mattina alle 6:00 e uno la sera dopo le 18:00. Lo stesso trend viene preferito anche dagli abitanti di E8 nei giorni festivi, quando invece in E3 preferiscono mantenere in temperatura il salotto. In E3 si registrano anche dei picchi di temperatura nelle ore dal pranzo, cosa che non si verifica durante la settimana, quando verosimilmente l'abitazione è inoccupata per l'intera giornata. La temperatura non supera mai i 20 °C.

L'insieme di queste rappresentazioni di statistica descrittiva ha reso possibile la descrizione del sistema edificio-impianto-occupante, nei limiti della disponibilità di dati acquisiti dal sistema progettato. Grazie a dati monitorati relativi alla climatizzazione invernale, sarebbe possibile una migliore descrizione del sistema e, allo stesso tempo, differenti strategie di gestione dell'impianto potrebbero essere giudicate in base a come esse influenzano i consumi, a parità di altre condizioni (esposizione, occupazione, ecc.). Simili analisi sono state condotte per le abitazioni C2017, come discusso di seguito.

### 3.2 Edifici C2017 – Aggregatore 2

L'analisi condotta è relativa al monitoraggio (corrispondente al periodo aprile 2017 – agosto 2018) di tre abitazioni appartenenti al gruppo C2017, ubicate nel Comune di Roma (zona climatica D) e ha interessato i dati monitorati di temperatura interna dei loro ambienti climatizzati, con l'obiettivo di descriverne la qualità termica.

La norma UNI EN 15251 [3], in appendice A [5], definisce i criteri che si raccomanda di considerare nel progetto e controllo degli ambienti interni. In particolare, la norma definisce due differenti metodi: il metodo A, che fa riferimento al modello di Fanger ed è da prendere in considerazione nel caso di ambienti dalla temperatura controllata; il metodo B, relativo invece alla teoria del comfort adattivo, il quale prevede una definizione dei requisiti ambientali in funzione di variabili esterne, usato qualora non vi sia un impianto di climatizzazione operante. L'utilizzo del primo metodo è raccomandato per ambienti riscaldati in inverno e raffrescati in estate. Dal momento che le abitazioni analizzate sono climatizzate si è scelto di applicare il metodo A.

La stessa norma fissa quattro diverse categoria di comfort, definite come intervalli di PPD (percentuale di insoddisfatti, UNI EN ISO 7730 [2]) e PMV (voto medio previsto, UNI EN ISO 7730 [2]), indici che possono essere considerati dei criteri di valutazione della qualità degli ambienti e che sono dipendenti da sei parametri termici (abbigliamento, attività svolta, temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria, umidità relativa). Le classi di comfort fissate dalla suddetta norma UNI EN 15251 sono le seguenti [5]:

- Classe I:  $PPD < 6\%$ ;  $-0,2 < PMV < +0,2$
- Classe II:  $PPD < 10\%$ ;  $-0,5 < PMV < +0,5$
- Classe III:  $PPD < 15\%$ ;  $-0,7 < PMV < +0,7$
- Classe IV:  $PPD > 15\%$ ;  $-0,7 > PMV$  o  $PMV > +0,7$  (non raccomandata)

dove la classe I corrisponde alla maggior condizione di comfort e la classe IV alla peggiore.

Nel metodo A, assumendo una specifica combinazione dei parametri termici dai quali dipendono gli indici PPD e PMV, è possibile esprimere le medesime classi in termini di *range* fissi di temperature operative. Essi sono riassunti nella tabella seguente.

**Tabella 19** Classi di comfort secondo la norma UNI EN 15251

Tipologia di spazio	Classe di comfort	Massimo per raffrescamento (periodo estivo). Abbigliamento ~ 0,5 clo
Edifici residenziali: spazi di stasi (soggiorno, camera da letto, cucina, ecc.). Attività sedentaria ~ 1,2 met	I	25,5 °C
	II	26 °C
	III	27 °C

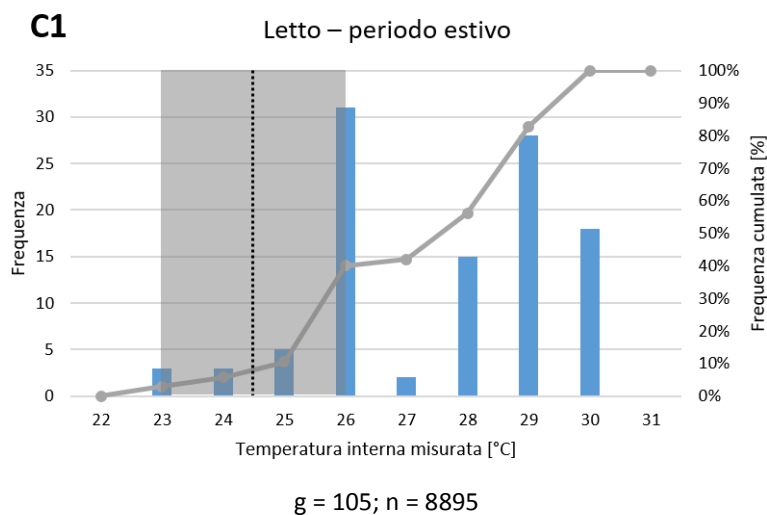
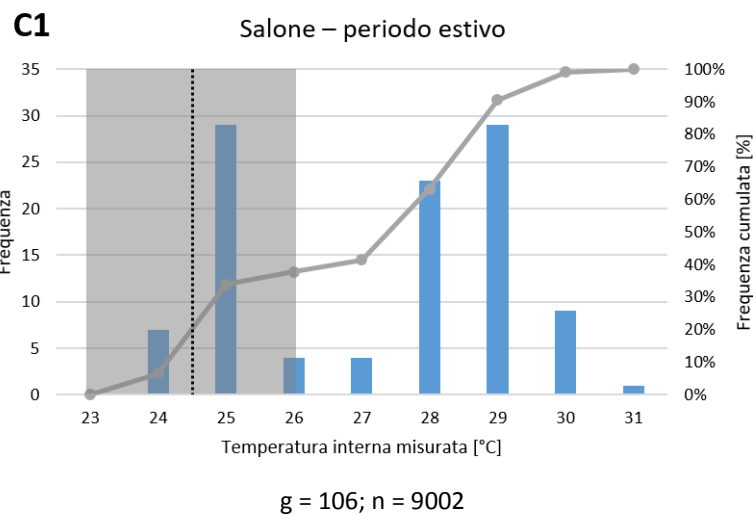
Ai fini di questo studio si è assunta la coincidenza tra temperatura operativa, rispetto alla quale sono fissati i requisiti, e temperatura interna, misurata dal sistema.

Le analisi condotte sugli ambienti individuati a valle dall'attività di preparazione del data-set (Sezione 2.1) hanno portato all'elaborazione delle seguenti rappresentazioni statistiche:

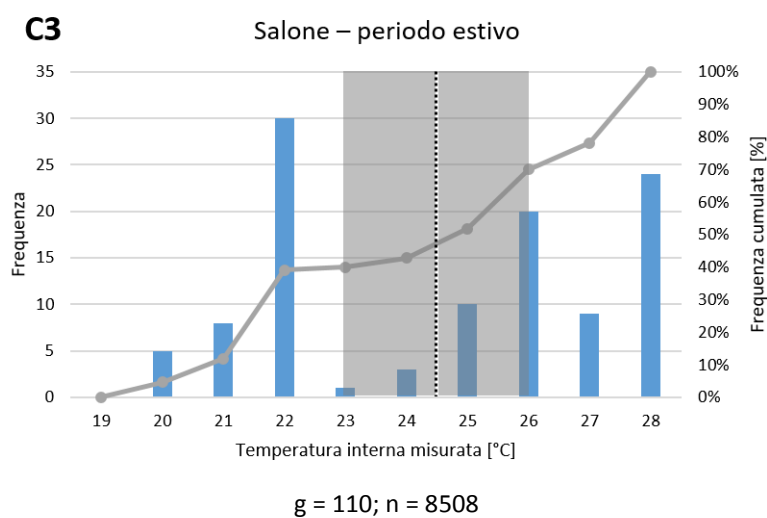
- distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera;
- grafici di andamento di temperatura media oraria per alcuni ambienti per giorni tipo.

Sulla base di queste rappresentazioni è stata descritta la qualità termica degli ambienti analizzati attraverso la relazione tra il parametro ambientale di temperatura interna e i requisiti normativi di qualità ambientale previsti dalla UNI EN ISO 7730 [2] e dalla UNI EN 15251 [5]. Le possibili correlazioni della temperatura interna con le caratteristiche del sistema (esposizione, inerzia e consumi per la climatizzazione) e con la tipologia di occupazione (preferenza termica e frequenza di interazione con il sistema) sono state discusse, evidenziando la potenzialità degli strumenti statistici individuati nel descrivere il comportamento del sistema edificio-impianto-occupante.

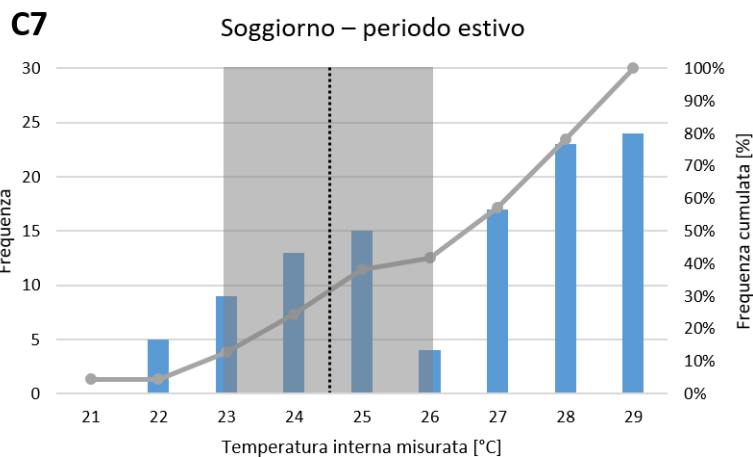
In particolare, il parametro di temperatura interna monitorata è stato studiato in termini di distribuzione di frequenza, calcolata la media giornaliera. I risultati sono riportati di seguito. Nei grafici seguenti "g" indica il numero di giornate e "n" il numero di record sulla base dei quali essi sono stati tracciati.



**Figura 18** Temperatura di salone e camera da letto calcolata su n record in periodo estivo. Distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera per giornate disponibili (g).



**Figura 19** Temperatura di salone calcolata su n record in periodo estivo. Distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera per giornate disponibili (g).

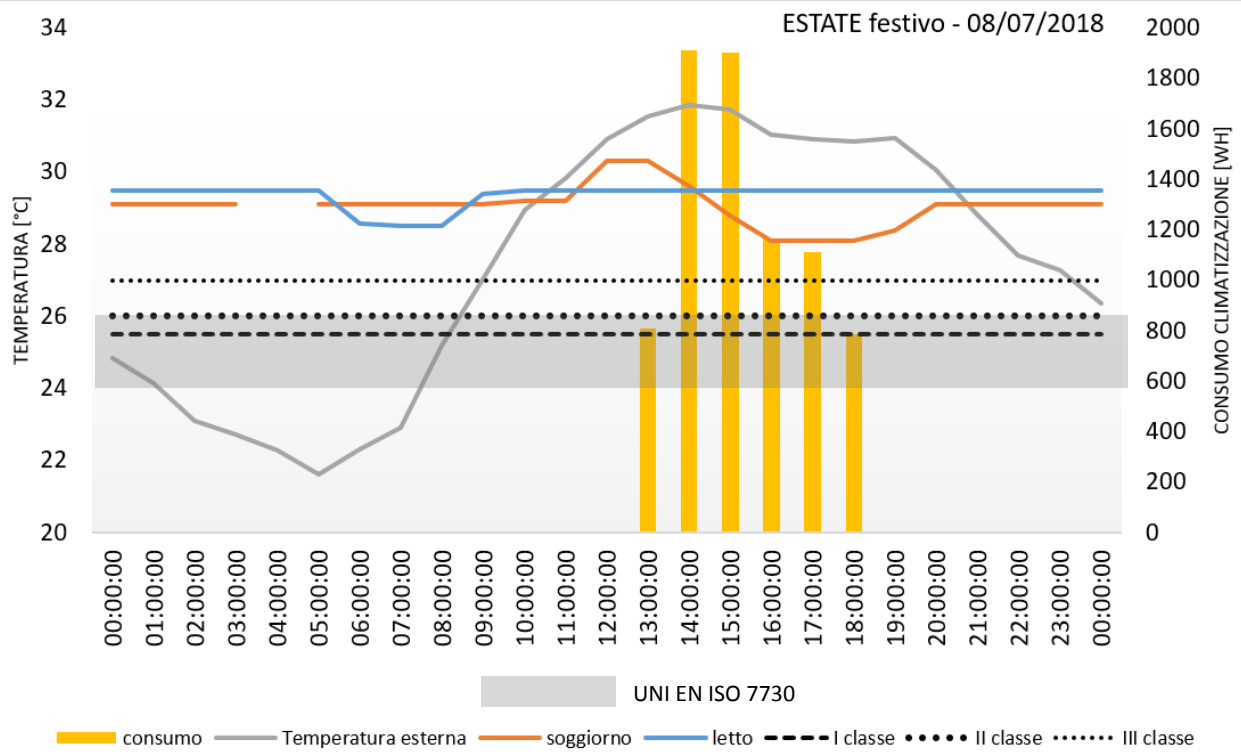


g = 110; n = 8895

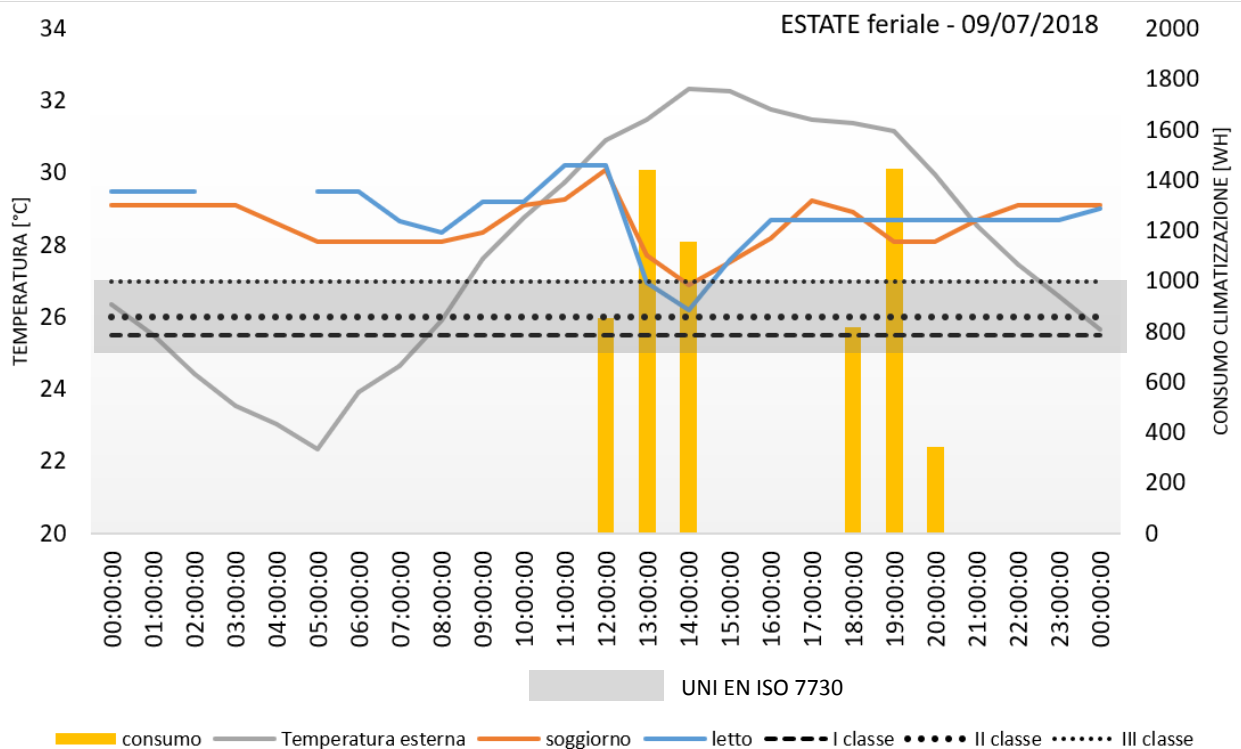
**Figura 20** Temperatura di soggiorno calcolata su n record in periodo estivo. Distribuzione in frequenza e frequenza cumulata del dato di temperatura media giornaliera per giornate disponibili (g).

Come si può osservare nei grafici sovrastanti (Figura 18 - Figura 20), le temperature interne medie giornaliere nei diversi ambienti delle abitazioni C2017 non sono sempre nei limiti raccomandati da UNI EN 7730 nel periodo estivo ( $24,5^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ , *range* compito in grigio nelle immagini). In particolare, in C1, nel salone e nella camera da letto, la temperatura media giornaliera è inferiore ai  $26^{\circ}\text{C}$  nel 63% e 40% dei casi, rispettivamente. Mentre nel salone essa non scende mai sotto ai  $23^{\circ}$ , al contrario, nella camera da letto, questo accade nel 3% delle giornate. La situazione è migliore in C3, dove la temperatura interna media giornaliera è inferiore ai  $26^{\circ}\text{C}$  nel 70% dei casi, ma nel 30% scende addirittura sotto ai  $23^{\circ}\text{C}$ . Infine, in C7, nel 30% dei casi la temperatura è al di sotto del limite raccomandato da UNI EN 7730 di  $26^{\circ}\text{C}$ . La particolarità di questa abitazione è che in quasi la totalità delle giornate nelle quali il requisito da UNI EN 7730 è rispettato, la temperatura interna è mediamente bassa, e spesso (29% delle giornate totali) sotto ai  $23^{\circ}\text{C}$ . Come verrà discusso in seguito, questo dato rileva un utilizzo del condizionatore più massiccio da parte di questo utente nelle sue azioni di controllo del sistema.

Per descrivere il comportamento del sistema in modo più rappresentativo, è opportuno riferirsi al dato medio orario, piuttosto che a quello medio giornaliero, il quale è influenzato dall'escursione notturna. Come anticipato in Sezione 2.1, tale valutazione è stata possibile solo a livello di giornate tipo. Di seguito vengono riportati e discussi i risultati. Le serie di dati di temperatura interna sono state plottate con i dati di temperatura esterna misurati da stazioni climatiche limitrofe [4] e con i dati di consumo di climatizzazione come elaborati nell'abito dello studio (Sezione 4), al fine di rilevare e descrivere possibili correlazioni, come saranno discusse più avanti.



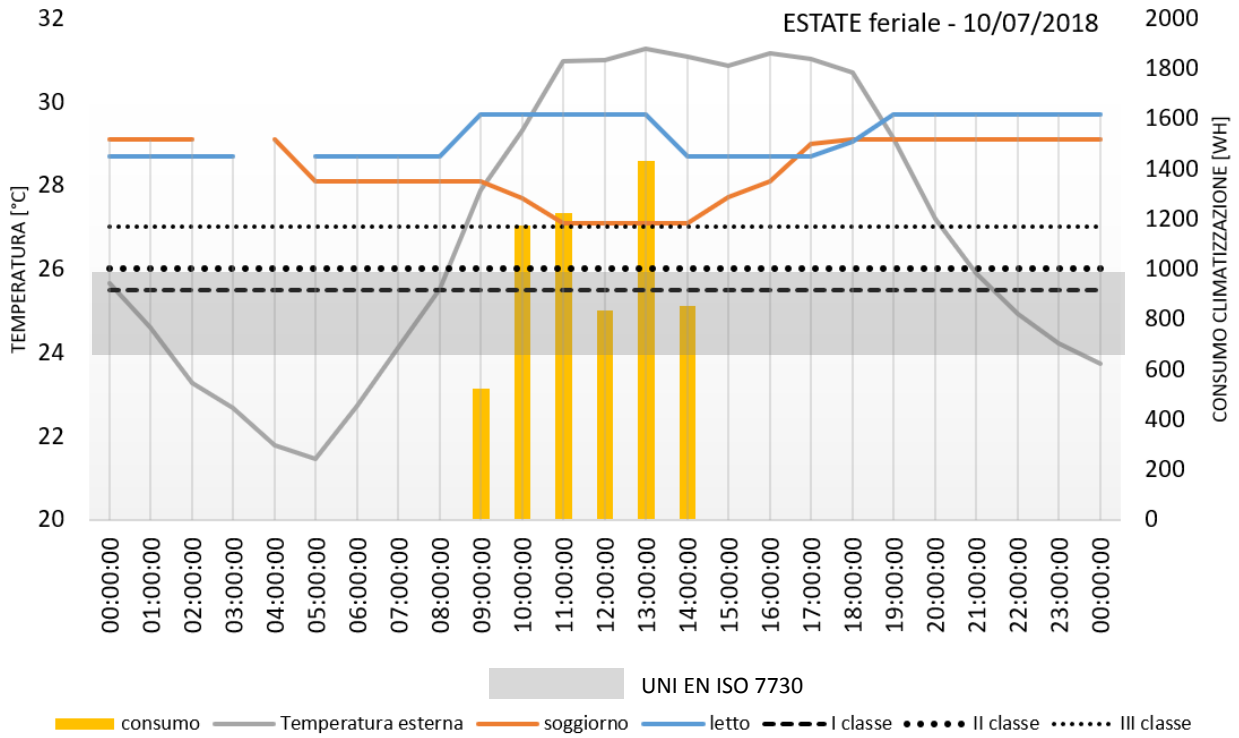
**C1**



**Figura 21 (a)** C1 -consumi di climatizzazione e andamento delle temperature interne ed esterne medie orarie per giornate tipo e requisiti di comfort secondo UNI EN 15251 e UNI EN ISO 7730.

**C1**





C1

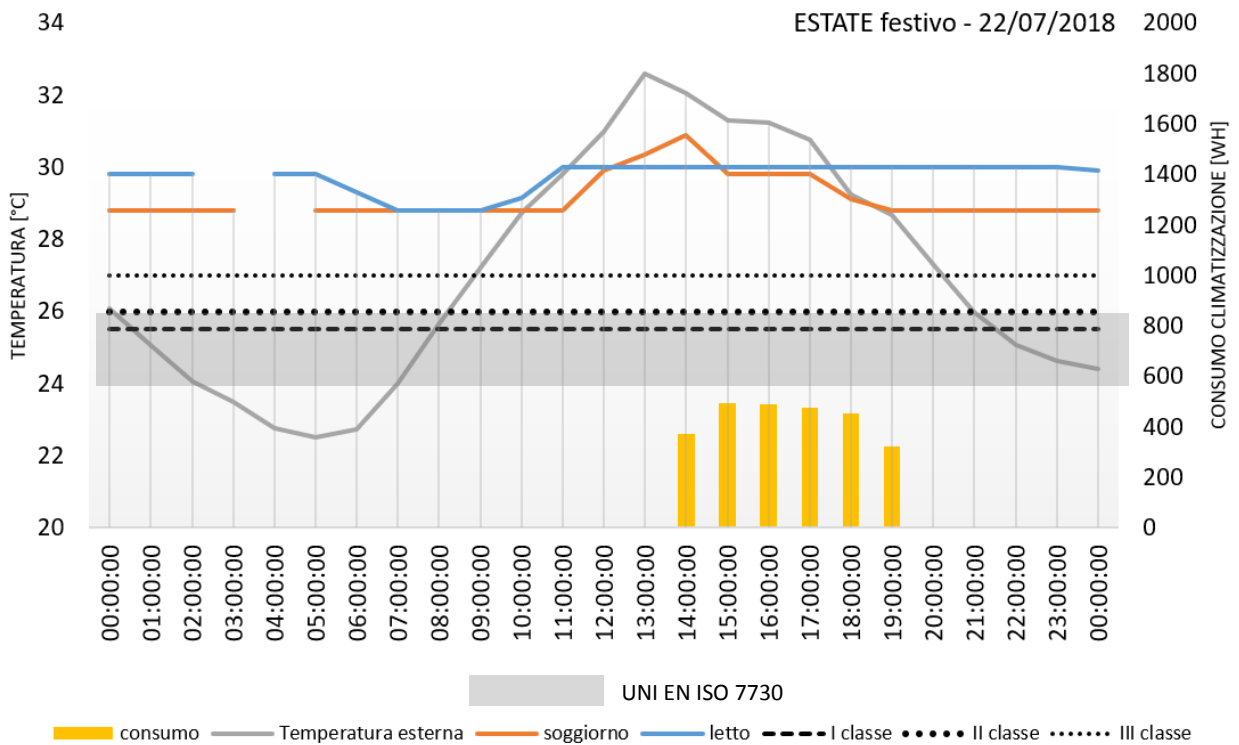
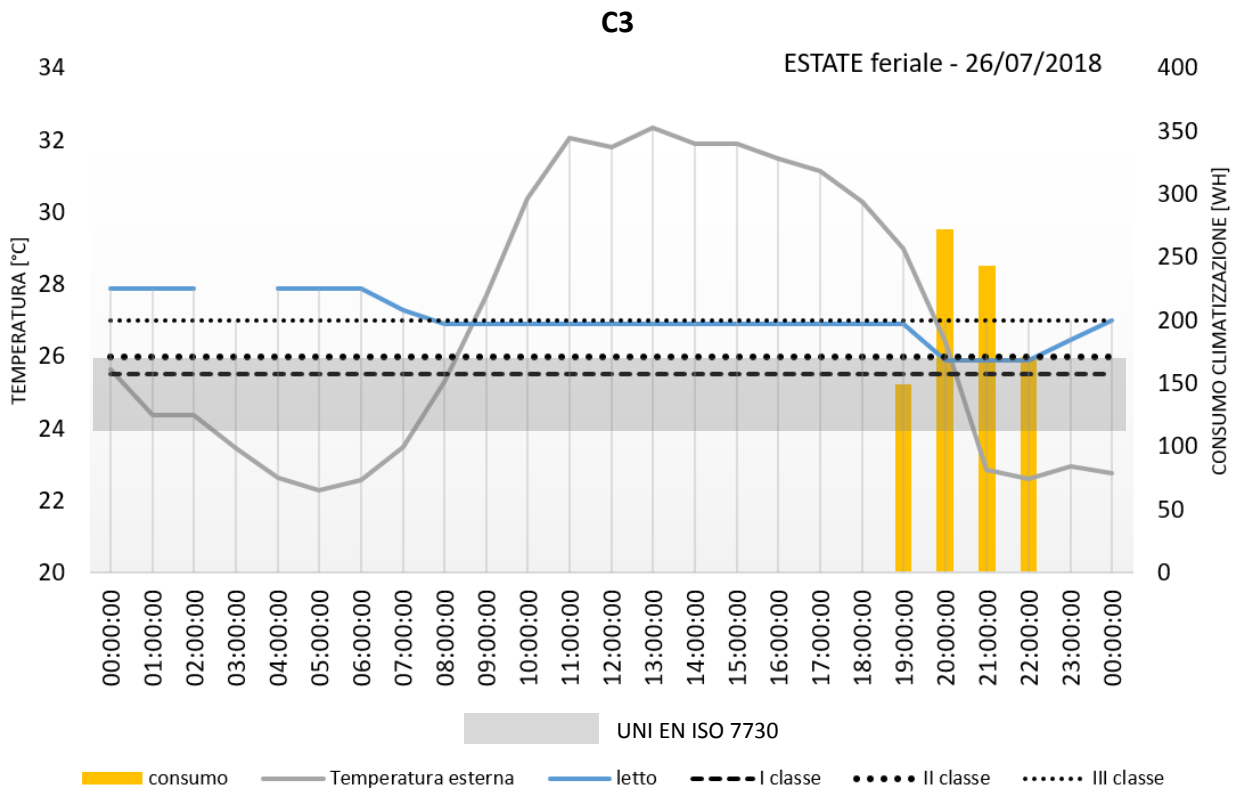
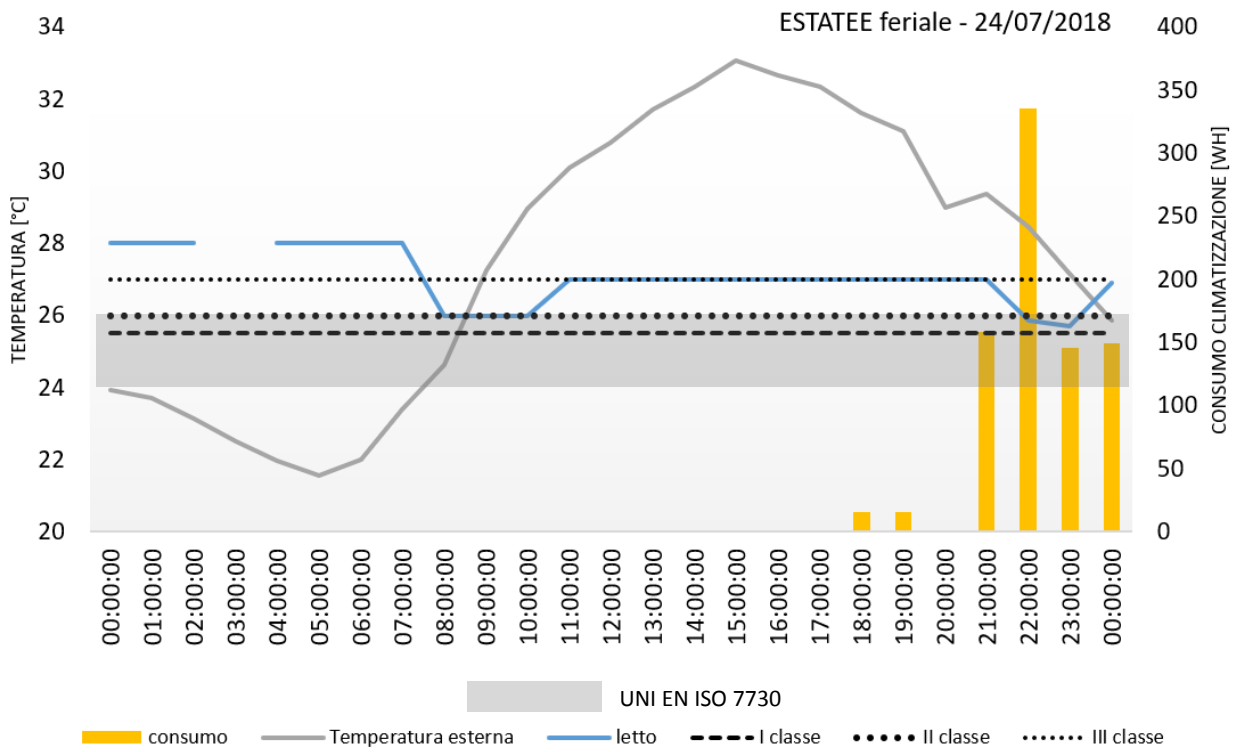
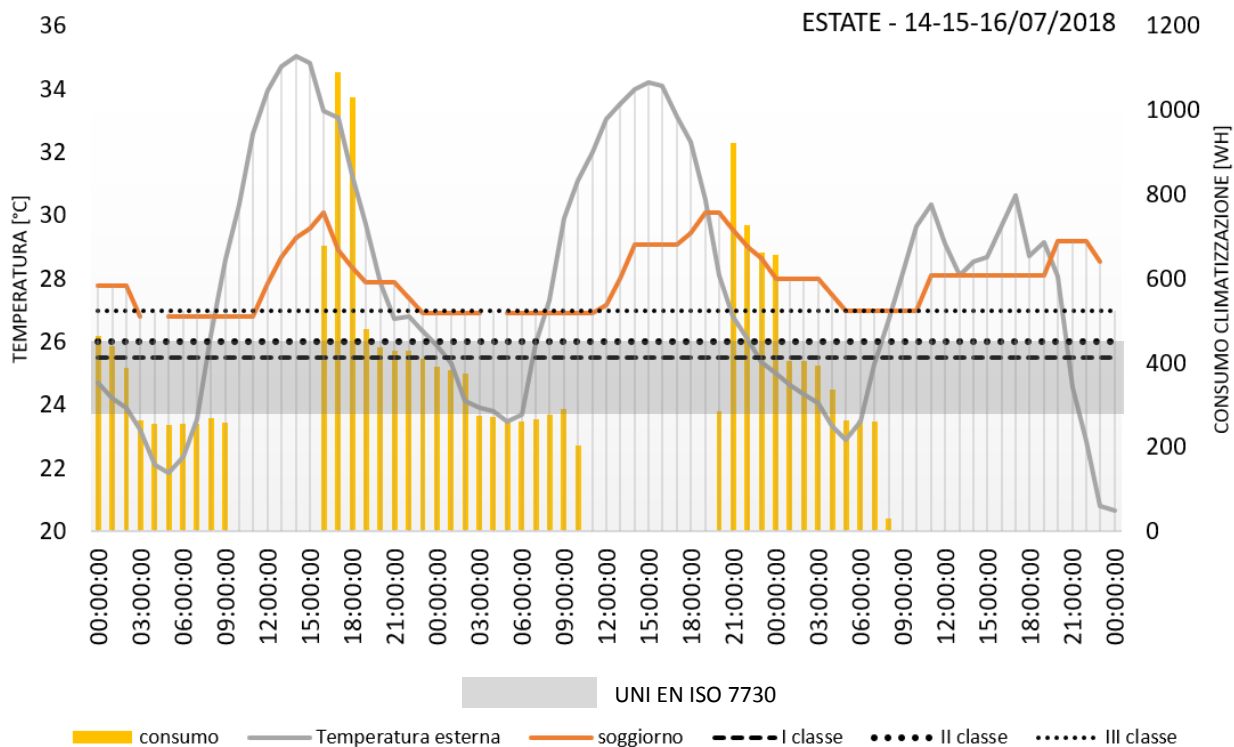


Figura 21 (b) C1 -consumi di climatizzazione e andamento delle temperature interne ed esterne medie orarie per giornate tipo e requisiti di comfort secondo UNI EN 15251 e UNI EN ISO 7730.

C3



**Figura 22** C3 -consumi di climatizzazione e andamento delle temperature interne e esterne medie orarie per giornate tipo e requisiti di comfort secondo UNI EN 15251 e UNI EN ISO 7730.



C7

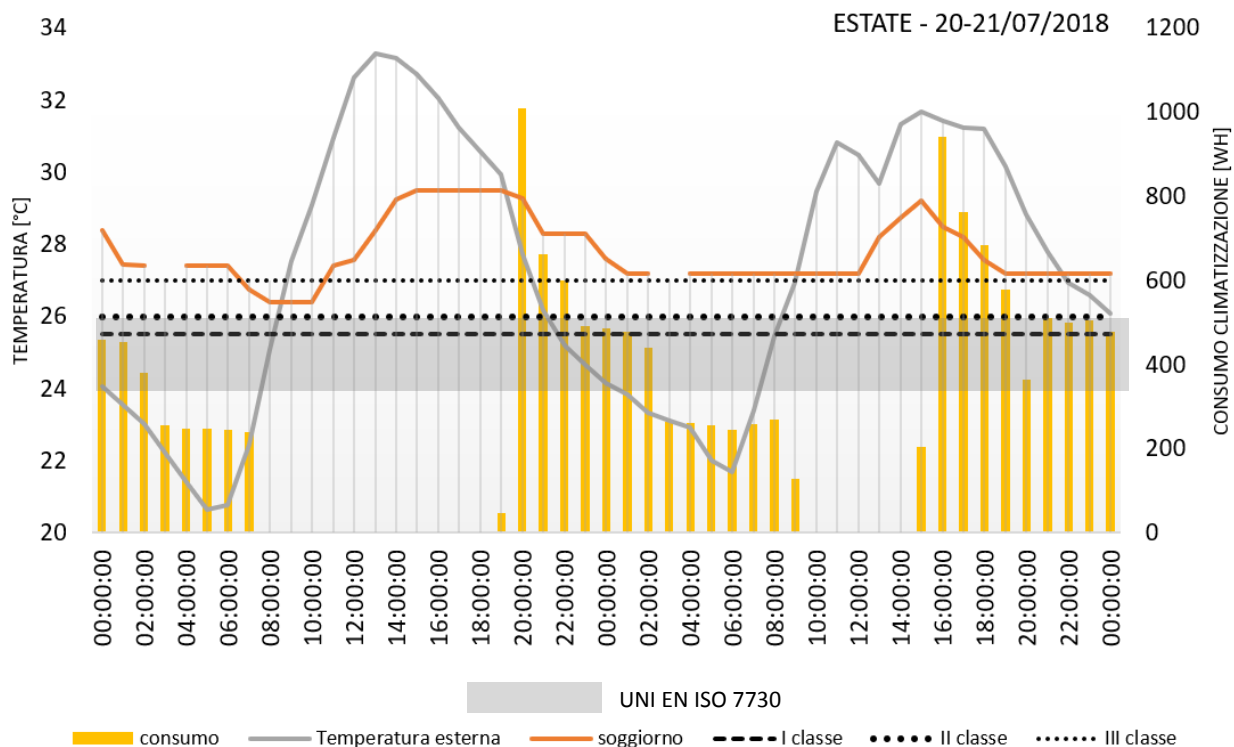


Figura 23 C7 -consumi di climatizzazione e andamento delle temperature interne e esterne medie orarie per giornate tipo e requisiti di comfort secondo UNI EN 15251 e UNI EN ISO 7730.

L'area evidenziata in grigio individua i limiti raccomandati dalla norma UNI EN ISO 7730, mentre le linee tratteggiate rappresentano i limiti superiori delle tre classi di comfort previste dalle UNI EN 15251. Il soddisfacimento di tali requisiti è riassunto in Tabella 20.

**Tabella 20** Frequenza (espressa in % di ore) con la quale il parametro di temperatura entra nei requisiti normativi UNI EN ISO 7730 e UNI EN 15251 nelle varie giornate tipo.

		% di ore per giorno tipo				
		UNI EN ISO 15251				UNI EN ISO 7730
		I classe	II classe	III classe	IV classe (no comfort)	23°C - 26°C
<b>C1</b>	<i>Soggiorno</i>					
	- 08/07/18	0%	0%	100%	0%	0%
	- 09/07/18	0%	0%	4%	96%	0%
	- 10/07/18	0%	0%	100%	0%	0%
	- 22/07/18	0%	0%	100%	0%	0%
	<i>Letto</i>					
	- 08/07/18	0%	0%	100%	0%	0%
	- 09/07/18	0%	0%	9%	91%	0%
- 10/07/18	0%	0%	100%	0%	0%	
- 22/07/18	0%	0%	100%	0%	0%	
<b>C3</b>	<i>Letto</i>					
	- 24/07/18	0%	21%	71%	29%	21%
	- 26/07/18	0%	13%	71%	29%	13%
<b>C7</b>	<i>Soggiorno</i>					
	- 14-16/07/18	0%	0%	37%	63%	0%
	- 20-21/07/18	0%	0%	9%	91%	0%

Sulla base di queste rappresentazioni è di seguito discussa la qualità termica degli ambienti in termini di rispondenza del dato di temperatura alle raccomandazioni di qualità ambientale e di comfort (sia secondo la norma UNI EN ISO 7730 [2] che secondo la UNI EN 15251 [5]). Inoltre, è stata analizzata la sua possibile relazione con le temperature esterne e con la tipologia di utenza, commentando, da una parte i fattori di esposizione e di inerzia, e dall'altra le preferenze termiche degli occupanti.

In particolare, come è possibile osservare dai grafici e dalla Tabella 20, nelle giornate tipo selezionate, la temperatura è quasi sempre superiore al requisito di comfort espresso in temperatura massima raccomandata. Nei due ambienti dotati di climatizzatore in C1, le temperature non salgono mai al di sopra dei 30°C, ma molto raramente scendono sotto i 27°C. Nonostante le quattro giornate considerate siano abbastanza simili a livello di andamenti delle temperature esterne medie orarie, con la minima alle 5:00 della mattina e la massima alle 13:00, i grafici (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) evidenziano pattern di accensione dell'impianto differenti. In particolare, in tre casi su quattro gli *split* vengono accesi per sei ore consecutive, mentre in uno l'impianto viene acceso per tre ore nel momento più caldo della giornata e poi di nuovo la sera, quando le temperature interne generalmente ricominciano ad alzarsi. Non a caso quest'ultimo è il caso di una giornata feriale, nella quale probabilmente l'abitazione non è stata occupata nel pomeriggio. Al contrario, in una giornata feriale di fine luglio, c'è stata accensione nelle ore pomeridiane, risultando in un consumo più basso che in altre giornate, poiché le temperature richieste sono state meno basse e si è rinunciato a climatizzare la zona notte. In generale si osserva una risposta abbastanza rapida dell'ambiente dal momento in cui viene acceso l'impianto. Le condizioni di comfort sono raggiunte solo nella giornata caratterizzata da un consumo piuttosto elevato e impulsivo: condizioni prossime al comfort sono state raggiunte con un consumo minore quando il controllo è occorso in anticipo rispetto alle ore più calde. C3 (Figura 22) consuma molta meno energia per la climatizzazione, come sarà meglio discusso in seguito (Sezione 4), controllando la temperatura solo nella zona notte e a partire dalle ore serali.

C7 è invece l'abitazione delle tre che usa maggiormente il climatizzatore. Quello che si rileva chiaramente grazie ai grafici (Figura 23), è che l'involucro dell'edificio garantisce uno sfasamento temporale tra il picco di temperatura esterna e quella interna pari a circa tre ore. Gli occupanti dell'abitazioni scelgono di accendere il climatizzatore quando la temperatura intera media oraria raggiunge i 30°C, senza cercare dunque di anticipare il surriscaldamento dell'ambiente, come evidenziato dal fatto che l'accensione in un giorno festivo

(15/07/2017) occorra alle ore 15:00. Nei giorni feriali l'accensione occorre la sera e l'impianto non viene spento fino alla mattina successiva, risultando in un continuo abbassamento delle temperature interne che raggiungono il loro minimo intorno ai 27°C nelle ore centrali della notte. Dall'analisi delle temperature esterne, risulta bene evidente come gli occupanti dell'abitazione C7 preferiscano, nel pieno della notte, tenere acceso il sistema di raffrescamento, piuttosto che aprire le finestre e permettere un "free cooling". La temperatura esterna risulta infatti sensibilmente inferiore rispetto a quella esterna e l'apertura delle finestre porterebbe di certo all'abbassamento della temperatura interna.

L'insieme di queste rappresentazioni di statistica descrittiva ha reso possibile la descrizione del sistema edificio-impianto-occupante, nei limiti della disponibilità di dati acquisiti dal sistema progettato. Ulteriori considerazioni sul sistema rispetto alle possibili correlazioni tra variabili, sono riferite in Sezione 5 dedicata al confronto tra le abitazioni.

## 4 Analisi dei consumi per la climatizzazione ambientale

### 4.1 Caratteristiche dei condizionatori

Per i casi pilota C2017 le analisi effettuate sui dati di consumo elettrico degli impianti di climatizzazione hanno permesso di effettuare analisi comparative su casi che presentano impianti di diversa taglia e tipologia. Infatti, gli edifici considerati presentano impianti di climatizzazione a espansione diretta del tipo a singolo *split* e *multisplit*, di diversa taglia e classe energetica. Il monitoraggio di queste apparecchiature è stato effettuato tramite l'installazione di *smart switch*, *smart plug* e soltanto per il caso C5 tramite *energy meter* installato sulla linea dedicata a una parte dei condizionatori presenti.

Nella Tabella 21 sono riportati, solamente per gli edifici che sono stati utilizzati per le analisi, una descrizione delle apparecchiature di climatizzazione, della loro posizione di installazione e del tipo di monitoraggio, se presente.

**Tabella 21** Descrizione dei condizionatori installati nelle abitazioni selezionate per le analisi.

Energy Box	Condizionatori				Monitoraggio	Periodo monitoraggio
	Numero	Classe	Potenza BTU	Ambiente	Tipo	
C1	1	A	12000	Soggiorno	Smart switch	5 Luglio – 29 Agosto 2018
	1	A	9000	Camera	-	
C3	1	A+	9000	Camera	Smart plug	15 Aprile – 3 Agosto 2018
C5	1	A	9000	Cucina	Smart switch	1 Luglio – 1 Agosto 2018
	1	A	9000	Camera	Smart meter	
	1	A	9000	Camera	-	
	1	A	12000	Soggiorno	-	
C6	1	A	12000	Soggiorno	Smart switch	24 Maggio– 22 Agosto 2018
	1	A	9000	Camera	-	
	1	A	9000	Camera	-	
C7	1	A	12000	Soggiorno	Smart switch	3 Giugno– 31 Agosto 2018
C9	1	A+++	12000	Soggiorno	Smart switch	24 Maggio– 30 Agosto 2018
	1	A+++	9000	Camera		

Dalla Tabella 21 si evince che i dati a disposizione, in alcuni casi, non sono esaustivi delle apparecchiature presenti, quindi il consumo di alcuni condizionatori in C1 e C6, può essere individuato solamente all'interno

dei consumi generali dell'abitazione. Inoltre, il periodo di monitoraggio non è fisso per tutti gli edifici analizzati, di conseguenza i dati a disposizione non possono essere considerati come descrittivi del comportamento dell'edificio in una stagione di raffrescamento.

#### 4.2 Caratterizzazione dei consumi elettrici attraverso tecniche di data analytics

Le analisi svolte sui dati di assorbimento elettrico per le abitazioni C2017, sono state condotte nell'ottica della caratterizzazione dei livelli di consumo, sia globali che dei condizionatori monitorati, confrontando questi valori con i dati di temperatura esterna e interna.

I dati di temperatura interna per i diversi ambienti delle abitazioni sono frutto del monitoraggio effettuato tramite multisensori Fibaro, in grado di raccogliere dati ambientali di temperatura, irradianza e movimento. I dati di temperatura esterna, invece, provengono dal database dei dati storici climatici di Wunderground.com, utilizzando i dati raccolti da due stazioni meteo diverse, situate in zona Prenestino-Centocelle [4]. Si è scelto di utilizzare i dati da due stazioni meteo diverse e mediare i dati, per poter ottenere una serie storica di temperature dell'aria esterna, il più possibile priva di discontinuità di monitoraggio. A valle di questo processo, nei casi in cui singole osservazioni di dati di temperature risultavano ancora mancati, si è intervenuti interpolando linearmente.

Per quanto riguarda i dati di consumo elettrico per i casi di residenziale, come quelli delle abitazioni considerate, i profili di carico non sono regolari con assorbimenti continuativi, quindi analizzando il profilo giornaliero, si osserva una serie di impulsi relativi all'accensione delle utenze e ai loro cicli di funzionamento. Questo comportamento ha reso difficoltoso l'utilizzo dei dati per una analisi di profilo, in quanto i grandi carichi, anche se analizzati separatamente dagli altri, non sono facilmente distinguibili in modo automatico, a causa della loro rapidità di estinzione, oltre che della loro entità variabile dovuta al loro regime di funzionamento.

Data la natura impulsiva del profilo di assorbimento elettrico delle utenze e la discontinuità di valori di monitoraggio validi, è stato necessario aggregare ulteriormente i dati quart'orari a disposizione, per poter effettuare analisi orarie, giornaliere e per fasce orarie di consumo elettrico.

Di conseguenza, l'analisi dei dati degli edifici C2017 è stata condotta con la stessa metodologia, in modo da effettuare delle comparazioni tra gli edifici e l'utilizzo delle apparecchiature al loro interno, in modo da determinare le abitudini di consumo ed estrarre conoscenze intrinseche alla serie storica considerata.

I risultati di queste analisi, però, sono fortemente influenzati dal numero di dati utili a disposizione, così come la frazione di climatizzatori monitorati.

L'analisi è stata condotta tramite l'utilizzo di tecniche di *Data Mining*, le quali hanno permesso di estrarre correlazioni tra le variabili considerate, in modo automatico e non supervisionato.

Per fare ciò, la metodologia è stata articolata come segue:

1. Preparazione del dataset
2. Visualizzazione dei dati
3. Discretizzazione dei consumi elettrici
4. Identificazione delle correlazioni

La preparazione del dataset è stata svolta con le modalità descritte nel paragrafo 2.1, per permettere poi la visualizzazione dei dati a disposizione per una prima comprensione del caso studio.

I dati sono stati anche aggregati in modo da superare il problema dell'impulsività del profilo di carico delle utenze. Infatti, i dati a disposizione si riferiscono alla potenza media assorbita nel quarto d'ora, dunque riescono a cogliere completamente la dinamica di funzionamento delle utenze presenti in un edificio residenziale, nel quale i carichi non sono prolungati come nel caso di altre tipologie di edificio. Di conseguenza i carichi presentano dei profili impulsivi, difficili da analizzare su scala giornaliera. Per questa ragione i valori di potenza a disposizione sono stati prima riportati a valori medi orari e poi aggregati ulteriormente a valori di consumo giornaliero e per fascia oraria. In questo modo si è effettuata una sommatoria degli assorbimenti orari nell'intervallo di tempo considerato, fornendo un'indicazione dell'energia assorbita in quel periodo.

Il valore di consumo giornaliero è stato utilizzato in fase preliminare per visualizzare i dati in modo che fosse più chiara la frequenza di utilizzo dei climatizzatori presente, tramite una rappresentazione sul *Calendar plot*.



Questa rappresentazione fornisce informazioni di contestualizzazione dei dati associando ai consumi giornalieri l'informazione riguardante il giorno in cui sono stati registrati i consumi.

Già da una prima analisi dei dati aggregati su scala giornaliera si evince come gli apparecchi di climatizzazione sono stati impiegati soltanto in una piccola porzione di giorni, rispetto al periodo monitorato, questo dovuto a temperature esterne non sufficientemente alte da giustificare l'utilizzo di apparecchiature di climatizzazione degli ambienti. Inoltre, il profilo di occupazione risulta diverso per gli edifici considerati, determinando esigenze di climatizzazione diverse. Per alcune abitazioni, inoltre il numero di giorni in cui sono stati accesi i climatizzatori sono probabilmente ancora più bassi a causa di una probabile assenza di occupazione in alcuni giorni all'interno del periodo di monitoraggio.

L'aggregazione dei dati per fascia oraria è stata effettuata per condurre le analisi con tecniche automatiche di Data Analytics, in particolare utilizzando il CART (*Classification and Regression Tree*), una tecnica in grado di costruire uno schema ad albero che permette di raggruppare dati simili in base a variabili indicate dall'utente, utilizzato come classificatore dei dati di consumo elettrico [6].

Questa tecnica riesce a creare gruppi di dati selezionando le variabili più significative tra quelle fornite dall'analista. In questo modo, l'algoritmo riesce a identificare non solo le variabili rilevanti per la classificazione, ma anche i valori rilevanti per effettuare degli split dei dati in base alle variabili selezionate.

Il CART ha un approccio top-down, dividendo il dataset in modo tale da trovare localmente il valore ottimo per *split* i dati sulla base di una certa variabile. La struttura di questo algoritmo permette di dividere i dati in modo da effettuare solamente split binari, quindi ogni volta che diviso il dataset in base a una variabile, esso viene diviso in due porzioni, le quali possono essere ulteriormente divise successivamente.

Il valore ottimo viene calcolato valutando l'impurità dei nodi parentale e quella dei nodi figli, quindi la scelta ottimale risulta essere quella con il più alto guadagno di impurità degli split. Il calcolo dell'impurità per il CART è stato effettuato attraverso l'utilizzo del parametro Gini. L'indice di Gini è definito come  $Gini(t) = 1 - \sum_{i=0}^{c-1} [p(i|t)]^2$ , dove  $p(i|t)$  è la frazione di record che appartengono alla classe  $i$  nel nodo  $t$  e  $c$  è il numero di classi considerate. [7]

Questo tipo di tecnica risulta molto interessante non solo in termini di caratterizzazione dei dati storici, ma anche come strumento predittivo, in quanto al ripresentarsi di condizioni analoghe è possibile esprimere con una certa probabilità, basata sull'inferenza dei dati usati, quale sarà il livello di consumo.

Data la natura completamente *data-driven* dell'algoritmo, vale la pena sottolineare come un alto numero di dati validi possa essere in grado di determinare split dei dati più efficaci evitando problemi di overfitting. Un albero decisionale che è viziato dall'overfitting è in grado di dividere i dati in modo eccessivo, raccogliendo nei nodi foglia, cioè nei gruppi finali dei dati, un piccolo numero di dati. Dunque, un albero con un altissimo numero di nodi foglia riuscirebbe a classificare in modo migliore i dati utilizzati, ma caratterizzandoli scarsamente, poiché ogni dato farebbe parte di una categoria a sé stante. Come conseguenza dell'overfitting, l'errore commesso in training, quindi nella costruzione del modello, risulta molto inferiore dell'errore commesso nell'utilizzo del modello in fase di testing. L'errore commesso nella fase di training diminuisce all'aumentare della dimensione dell'albero decisionale, poiché l'albero aumenta la sua capacità di descrizione dei dati. L'errore commesso in fase di testing invece diminuisce all'aumentare della dimensione dell'albero costruito, però quando la caratterizzazione dei dati non è più efficace a causa dell'overfitting, cambia trend iniziando a crescere. [7]

Il CART in questo caso è stato utilizzato come classificatore solamente per caratterizzare i dati, poiché si è cercato di determinare il livello di consumo dei condizionatori più probabile a parità di valori di temperatura esterna, giorno della settimana e fascia oraria. Si è scelto di utilizzare come variabile di uscita di questa tecnica una variabile discreta e non continua per facilitare la lettura dei risultati e rendere più efficace la loro interpretazione.

Infatti, i valori di consumo aggregato per fascia oraria, sono stati discretizzati in modo tale da ottenere classi di livello di consumo, in modo da determinare fasce di consumo in determinate condizioni al contorno dettate dalle variabili utilizzate come input.

Per ottenere delle classi di livello di consumo, è stato utilizzato un algoritmo di discretizzazione basato sulla minimizzazione del parametro SSE (i.e. *Sum of Squared Error*) calcolato per gli intervalli di discretizzazione individuati.

La discretizzazione è stata utilizzata per trasformare i valori di consumo sia dei condizionatori che generali, da numerici a categorici, dunque a valle di questa operazione al consumo ci si riferirà ad essi, ad esempio, in termini di livello “basso”, “medio” o “alto”.

Per quanto riguarda la posizione dei breakpoints per l’identificazione degli intervalli di discretizzazione, essi sono stati estrapolati tramite un algoritmo di clusterizzazione gerarchica mono dimensionale (i.e. Metodo di Ward) [8], poi ottimizzati tramite l’utilizzo di aSAX (i.e. adaptive Symbolic ApproXimation) [9].

In questo modo, la distribuzione dei valori guida il posizionamento dei *breakpoints*, in modo da preferire zone a minore densità di punti come zone di interfaccia tra intervalli adiacenti, generando intervalli con dati il più consistenti possibili tra loro.

Il numero di intervalli in cui discretizzare la variabile è stato estratto anche esso in modo automatico, nella prima fase. Infatti, è stato scelto il numero di intervalli che generava cluster con algoritmo gerarchico Ward con indice di validazione di Davies-Bouldin migliore, facendo variare il numero di cluster possibile da un minimo di 2 a un massimo di 4.

L’indice di validazione fornisce una indicazione della qualità dei cluster trovati, quindi sceglie il numero di cluster ottimale per avere gruppi con la più alta similarità possibile internamente e la più bassa esternamente. In questo modo, una discretizzazione non supervisionata, che non è soggetta a problemi di inizializzazione, viene ottimizzata ancora in modo non supervisionato, rifinando i bordi con la stessa metrica.

A questa discretizzazione poi è stato aggiunto un livello, cioè il livello spento, sulla base del consumo misurato.

L’accensione dei condizionatori è stata determinata sulla base dei consumi, utilizzando una regola supervisionata che riuscisse a discriminare consumi legati all’effettivo utilizzo dei condizionatori dai consumi legati al dispositivo di monitoraggio applicato. Infatti, consumi minori di 20 Wh in un’ora sono stati considerati come imputabili al dispositivo di monitoraggio applicato, poiché valori di consumo di questa entità sono stati registrati per la maggior parte del tempo, anche in periodi in cui la temperatura esterna è sufficientemente bassa da non giustificare l’utilizzo del condizionatore. In questo modo, è stato possibile determinare se il consumo orario presente si riferiva al funzionamento dell’apparecchiatura oppure no, di conseguenza aggregando i dati per fascia oraria si è potuto ottenere il numero di ore di funzionamento all’interno della fascia oraria considerata.

Avendo discretizzato le variabili di consumo elettrico, il CART è stato utilizzato per classificare i valori di consumo dei condizionatori considerando come input la temperatura esterna, la temperatura interna, la fascia oraria e livello di consumo generale. In questo modo, è stato possibile contestualizzare i dati di consumo e risalire quindi alle probabili condizioni che hanno determinato uno specifico livello di consumo.

Di seguito verranno presentati i risultati delle analisi condotti sui singoli edifici circa la caratterizzazione dei consumi nel periodo di monitoraggio.

**Tabella 22** Fasce orarie da bolletta

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
<b>Lunedì</b>	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	
<b>Martedì</b>	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	
<b>Mercoledì</b>	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	
<b>Giovedì</b>	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	
<b>Venerdì</b>	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	
<b>Sabato</b>	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F3	
<b>Domenica</b>	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	

La caratterizzazione dell’utilizzo dei condizionatori è stata effettuata in primo luogo, attraverso la statistica descrittiva. In Figura 24, sono stati raffigurati i consumi associati ai condizionatori in relazione alla loro distribuzione tra le tre fasce orarie di consumo riferite in bolletta. In questo modo, è possibile individuare fasce orarie in cui i consumi dei condizionatori hanno una entità maggiore rispetto alle altre, identificando le ore di maggiore utilizzo dei condizionatori presenti. Le fasce orarie scelte sono quelle definite da bolletta e sono riassunte in Tabella 22.

In questo modo le fasce orarie sono state definite in modo supervisionato, ma in modo univoco e comune per tutti gli edifici considerati.

Distribuzione consumi tra fasce orarie

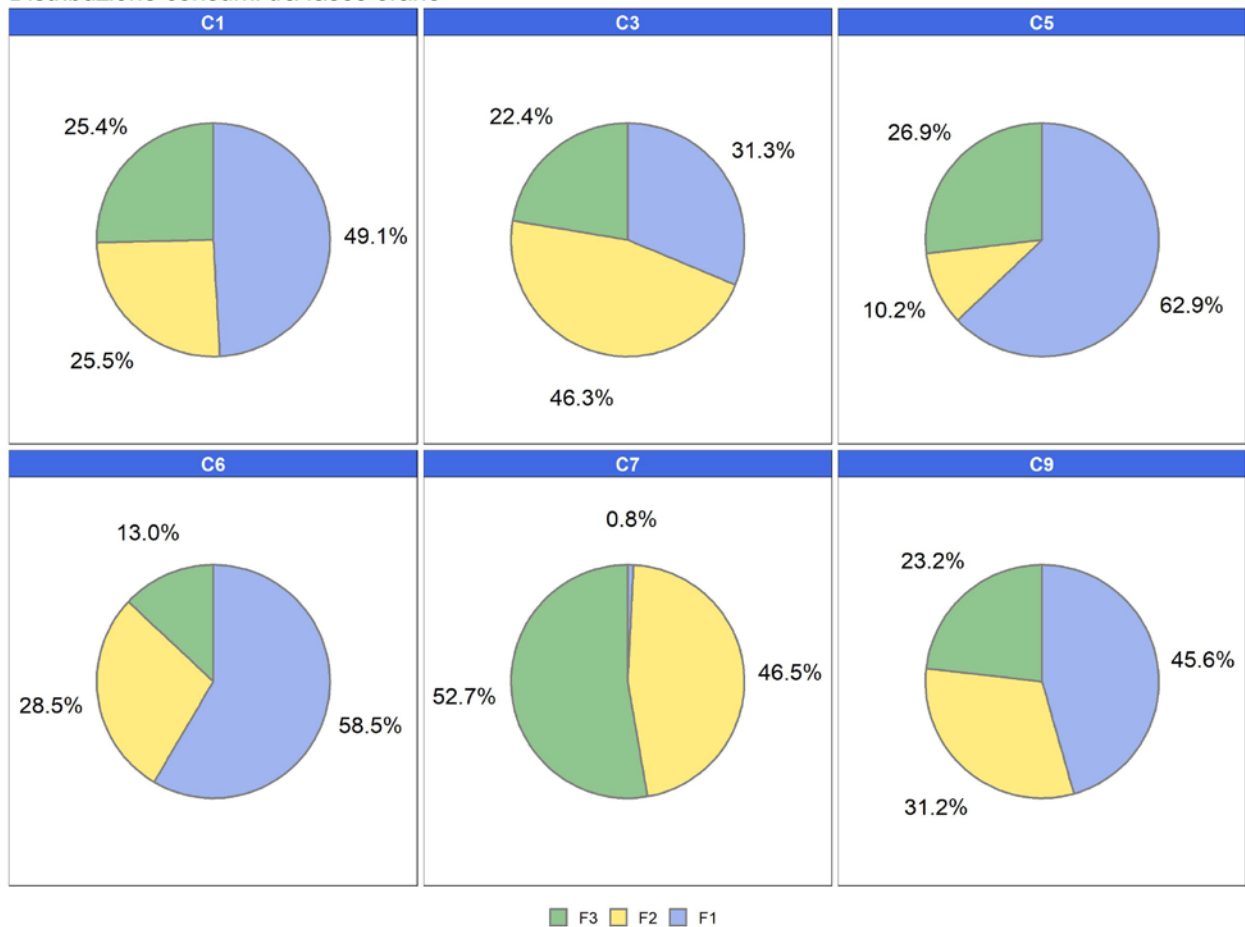


Figura 24 Distribuzione consumi tra le tre fasce orarie di consumo.

Come si evince dalla Figura 24, la distribuzione dei consumi tra le fasce non è simile per tutte le abitazioni, in quanto ci sono edifici in cui i consumi si presentano in maniera maggiore in alcune fasce orarie, piuttosto che in altre. Edifici come il C1, C3 e C9, hanno una distribuzione dei consumi all'incirca equilibrata e simile, mentre edifici come il C5 e il C6 presentano una preponderanza dei consumi nella fascia F1

Per caratterizzare ulteriormente i dati di consumo dei condizionatori nel periodo di monitoraggio considerato, si è indagato il peso che il consumo dei condizionatori assume per ognuno degli edifici come raffigurato in Figura 25.

Distribuzione consumi per utilizzo

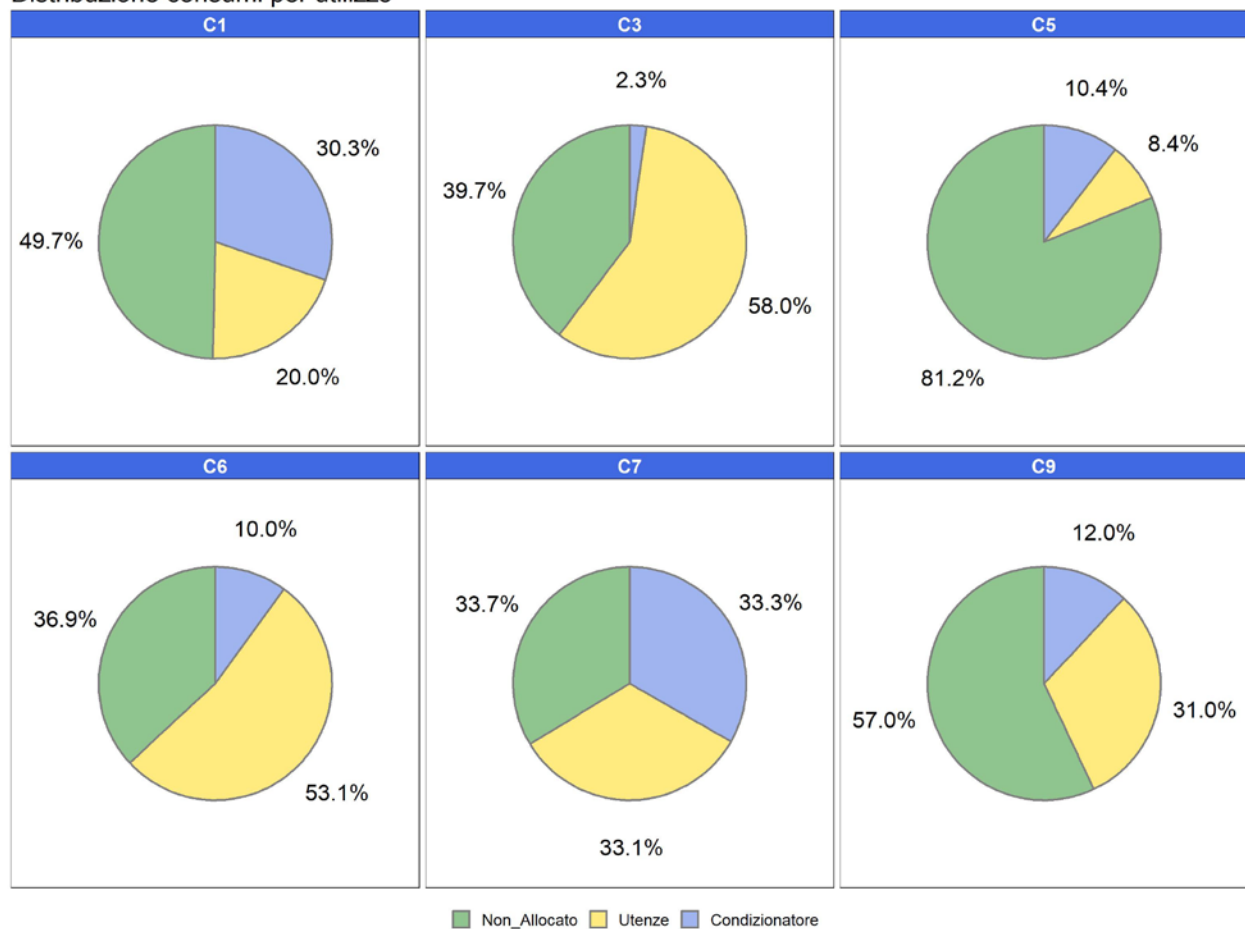


Figura 25 Distribuzione consumi in base all'utilizzo

Dalla Figura 25 si può notare come il peso dell'utilizzo dei condizionatori sui consumi totali non è sempre elevato e in molti casi il peso maggiore è attribuibile a consumi non specificatamente monitorati, racchiusi nella voce non allocato. Infatti, per le abitazioni analizzate sono stati monitorate diverse utenze, oltre ai condizionatori presenti, però il monitoraggio non riesce a tenere traccia di ogni dispositivo utilizzato all'interno dell'abitazione. Per questa ragione una fetta dei consumi viene denominata come "Non allocata", poiché non è possibile risalire all'utenza responsabile di quel consumo. Questo valore è risultante dalla sottrazione degli assorbimenti delle utenze monitorate dalla misura dell'assorbimento globale all'Energy Meter.

Bisogna considerare che sotto la voce "Non allocato", per i casi specifici degli edifici C1 e C6, sono inclusi anche i consumi dei condizionatori non monitorati singolarmente, per i quali non è stato possibile isolarli effettuando il breakdown dei carichi.

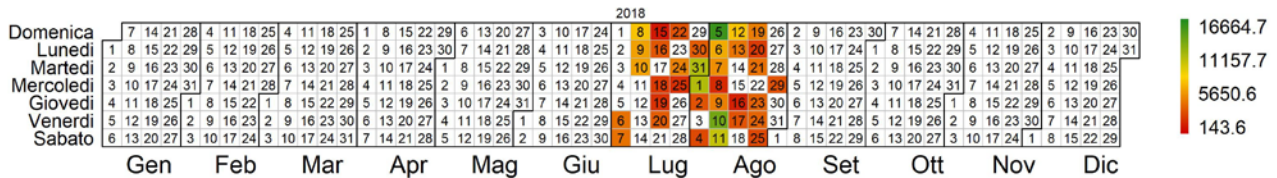
La percentuale dei consumi legati ai condizionatori non supera mai un terzo dei consumi complessivi nel periodo di monitoraggio considerato. Infatti, soltanto per gli edifici C1 e C7 i consumi relativi alle tre voci sono distribuiti più o meno equamente, con il consumo dei condizionatori attorno al 30%, negli altri casi questa voce assume percentuali più bassi. Per quanto riguarda i casi di C5, C6 e C9 la quota di consumo relativo ai condizionatori si attesta attorno al 10%, considerando che però le percentuali effettive sia per C1 che per C6 sono maggiori di quanto rappresentato, se si considera il contributo dei condizionatori non monitorati.

#### 4.2.1 Edificio C1 (Aggregatore 2)

L'edificio C1 è caratterizzato dalla presenza di due condizionatori posti nel soggiorno e una camera da letto, però solamente il primo è stato monitorato, quindi i valori di consumo analizzati si riferiscono solo a uno, poiché non è stato possibile disaggregare i consumi dell'altro. Nella Figura 26 sono stati riportati su Calendar

plot i consumi giornalieri del condizionatore analizzato, evidenziando con colori diversi i consumi nelle giornate in cui c'è stato un utilizzo dei condizionatori presenti. Anche se l'analisi non è esaustiva perché non riesce a considerare i consumi di tutti i condizionatori presenti, permette di caratterizzare l'utilizzo tipico di questa utenza dell'edificio.

**C1: Consumo giornaliero condizionatore[Wh]**

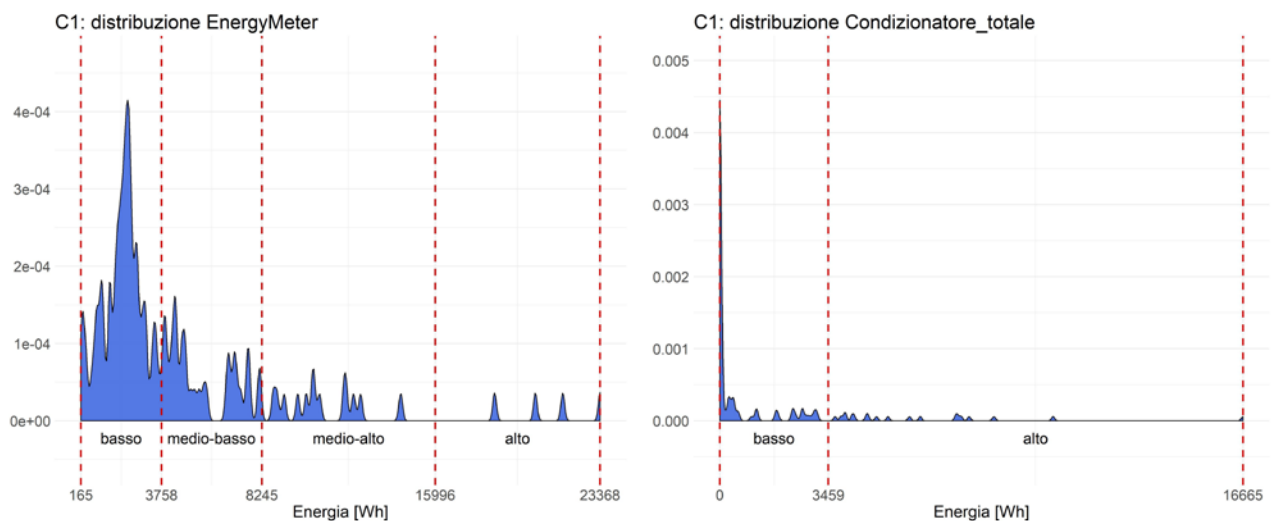


**Figura 26 C1: Calendar plot consumi giornalieri**

I consumi aggregati per fascia oraria sono stati discretizzati in modo da ottenere livelli di consumo di relativi sia al condizionatore che al consumo complessivo dell'edificio e i risultati ottenuti sono mostrati in Figura 27. In questa rappresentazione sono mostrate le funzioni di densità delle variabili di consumo elettrico globale, definito come *Energy Meter*, e dei soli condizionatori, evidenziando dove sono posizionati i breakpoints utilizzati per discretizzare le variabili ed esplicitando i livelli di consumo determinati.

I consumi del condizionatore hanno una bassa frequenza per valori alti e una grande variabilità a bassi valori, dunque vengono individuati solamente due livelli per separare consumi alti da consumi bassi.

Con queste variabili è stato costruito il CART come classificatore che ha permesso di raggruppare i dati di consumo del condizionatore in base ai consumi globali oltre che alla temperatura esterna, come rappresentato in Figura 28.



**Figura 27 C1: discretizzazione consumi**

Il CART costruito ha un errore di classificazione basso, pari al 20%, legando i consumi più alti a consumi globali più alti e a temperature esterne più alte di 26°C.

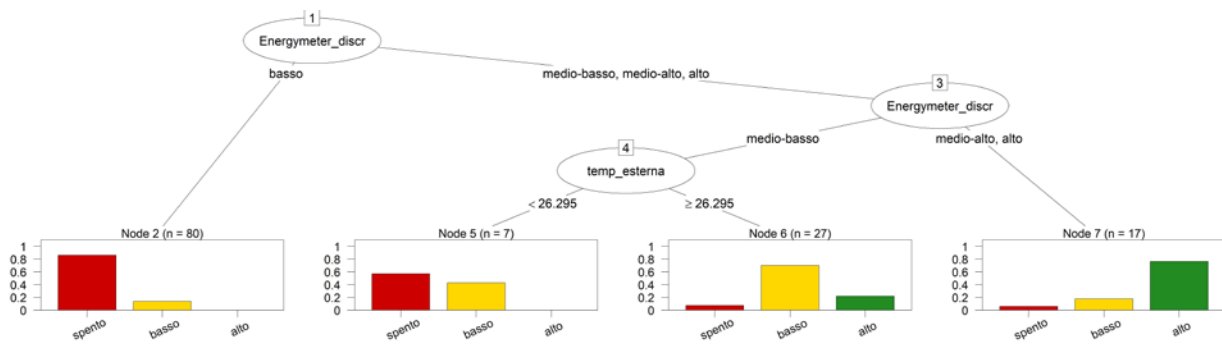


Figura 28 C1: CART per caratterizzare i consumi dei condizionatori dell'edificio

#### 4.2.2 Edificio C3 (Aggregatore 2)

L'edificio C3 presenta solamente un condizionatore, quindi il monitoraggio riesce a coprire la totalità delle utenze di raffrescamento presenti nell'edificio. L'utilizzo del condizionatore in questo edificio è molto ridotto, infatti, come si può vedere anche dalla Figura 29, le accensioni sono state solamente nove nel periodo di monitoraggio. Di conseguenza, i dati a disposizione sono risultati non sufficienti a generare uno schema ad albero tramite il CART; quindi i dati di consumo sono stati discretizzati e rappresentati in un grafico a barre. In questo modo, è stata rappresentata la frequenza di occorrenza dei diversi livelli di consumo.

**C3: Consumo giornaliero condizionatore[Wh]**

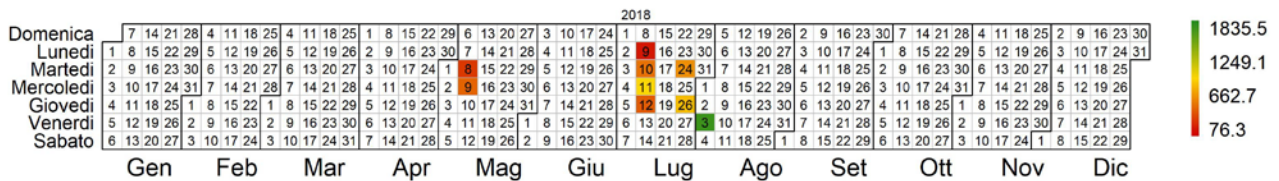


Figura 29 C3: Calendar plot consumi giornalieri

L'utilizzo limitato è evidente anche guardando la distribuzione in Figura 30, che mostra un picco molto marcato in corrispondenza dei valori taggati come "spento".

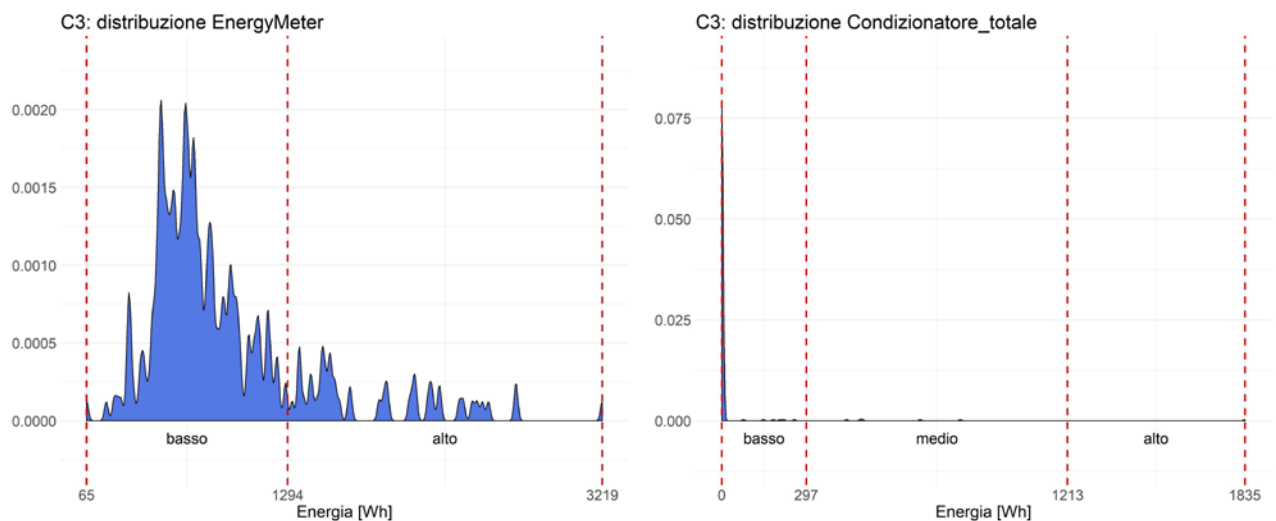


Figura 30 C3: distribuzione consumi



Nella Figura 31 viene evidenziato come l'accensione dell'apparecchiatura di raffrescamento è molto inferiore nel periodo di monitoraggio. L'istogramma rappresentato riporta i dati non raggruppati, quindi corrisponde a una rappresentazione della distribuzione dei dati a disposizione diviso per classi.

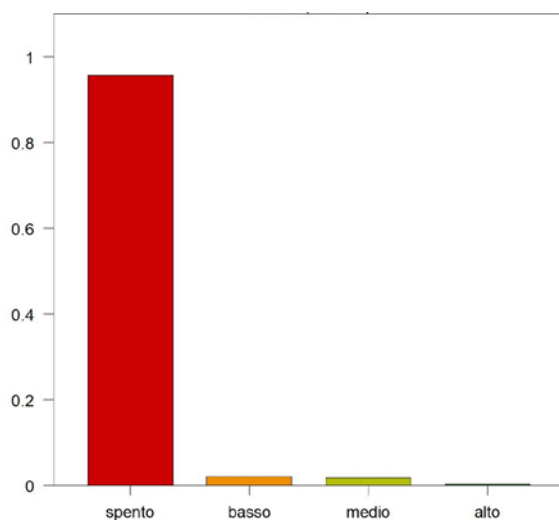


Figura 31 C3: istogramma dei livelli di consumo

#### 4.2.3 Edificio C5 (Aggregatore 2)

Il monitoraggio per questo edificio riesce a coprire tutti gli apparecchi installati in quattro stanze diverse, ma monitorati tramite uno *Smart switch* e uno *Smart meter*. In questo caso, i valori di consumi sono stati aggregati in modo tale da valutare l'utilizzo dei condizionatori complessivamente, analizzando le ore di funzionamento come sommatoria delle ore di funzionamento dei condizionatori presenti.

C5: Consumo giornaliero condizionatore[Wh]

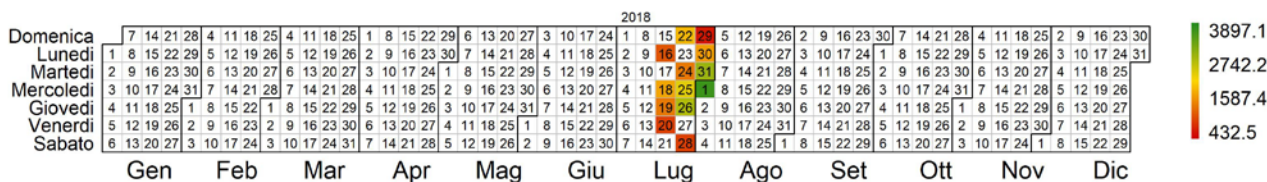


Figura 32 C5: Calendar plot consumi giornalieri

Dalla Figura 32 si può notare che nonostante i dati siano aggregati, i valori che si riferiscono a un utilizzo dei condizionatori sono relativamente pochi, rispetto al periodo di monitoraggio considerato.



Anche in questo caso sono stati discretizzati i valori di consumo sia globali che del singolo condizionatore. Per entrambi sono stati utilizzati tre livelli, sulla base dell'ottimizzazione ottenuta valutando l'indice di Davies-Bouldin, in questo modo sono stati discriminati i valori molto bassi dai valori molto alti, anche se caratterizzati da stessa frequenza. La distribuzione dei valori di consumo può essere osservata in Figura 36.

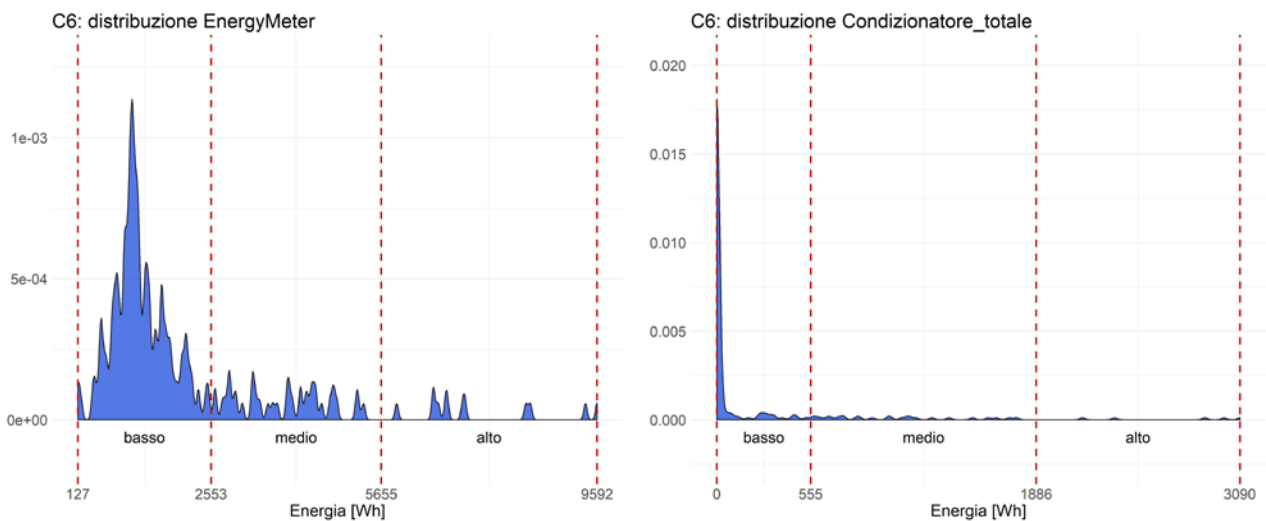


Figura 36 C6: distribuzione consumi

Dalla Figura 37, si evince che la temperatura esterna è un driver importante per la caratterizzazione dei consumi del condizionatore, in quanto il primo split viene effettuato per valori di temperatura superiori o inferiori a 28 °C circa. In questo modo, si intuisce come se la temperatura è relativamente bassa, per oltre l'80% dei casi il condizionatore rimane spento. Se la temperatura è più alta, invece, il condizionatore è il probabile responsabile del livello più o meno alto di consumo globale dell'edificio.

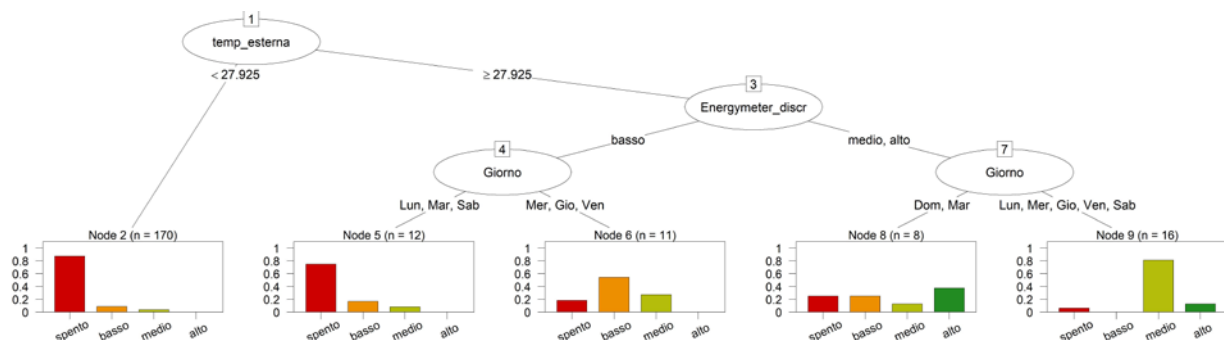


Figura 37 C6: CART per caratterizzare i consumi dei condizionatori dell'edificio

L'errore commesso nella classificazione con il CART di Figura 37 è del 17%, a causa di più scarsa caratterizzazione in alcuni nodi foglia, che non riescono a prevedere un consumo univoco legato alle condizioni descritte, questo probabilmente a causa del fatto che i consumi medi oppure alti misurati all'Energy Meter possono essere influenzati anche dai condizionatori non monitorati separatamente.

#### 4.2.5 Edificio C7 (Aggregatore 2)

Il monitoraggio dell'edificio C7 è in grado di coprire tutti gli apparecchi di climatizzazione presenti, dunque la caratterizzazione descrive in modo esaustivo il loro utilizzo. In Figura 38 si può notare come l'utilizzo del condizionatore in questo edificio è molto frequente, in particolare nel mese di Luglio.

**C7: Consumo giornaliero condizionatore[Wh]**

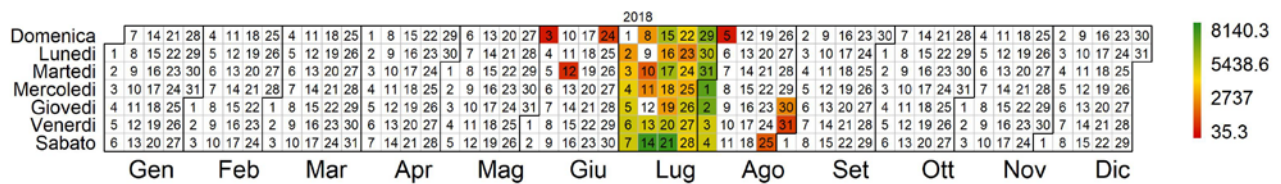


Figura 38 C7: Calendar plot consumi giornalieri

L'entità dei consumi giornaliera è molto variabile, ma presenta un addensamento nell'intervallo di valori associati al livello "medio", come si può notare nella Figura 39.

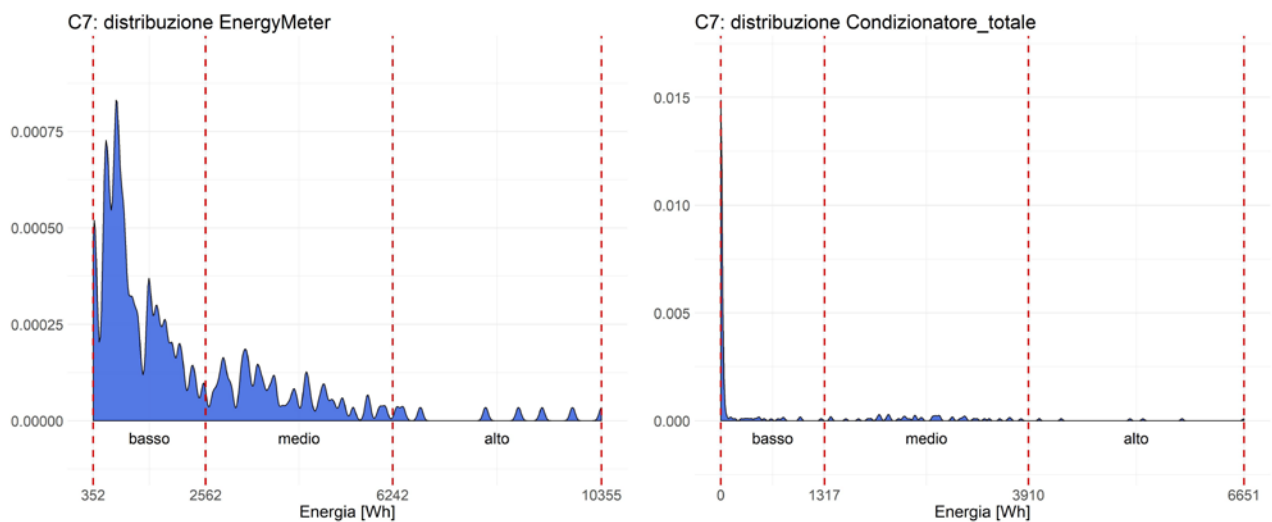


Figura 39 C7: distribuzione consumi

Il CART costruito riesce a caratterizzare bene l'utilizzo del condizionatore in questo edificio, come si può notare in Figura 40, in quanto riesce a identificare le cause dei livelli di consumo globali, commettendo un relativamente basso errore di classificazione, cioè pari al 17%. In particolare, il consumo globale classificato come "medio" oppure "alto" può essere associato a un utilizzo dei condizionatori solamente nelle fasce F2 e F3, definendo come livello di consumo prevalente quello "medio" nei giorni feriali, mentre nei fine settimana i consumi sono distribuiti in modo più o meno omogeneo tra i tre livelli. Nel caso in cui il consumo all'Energy Meter è taggato come "basso", il condizionatore viene utilizzato prevalentemente nel caso in cui la temperatura esterna risulta relativamente alta, altrimenti i consumi sono imputabili alle altre utenze dell'edificio.

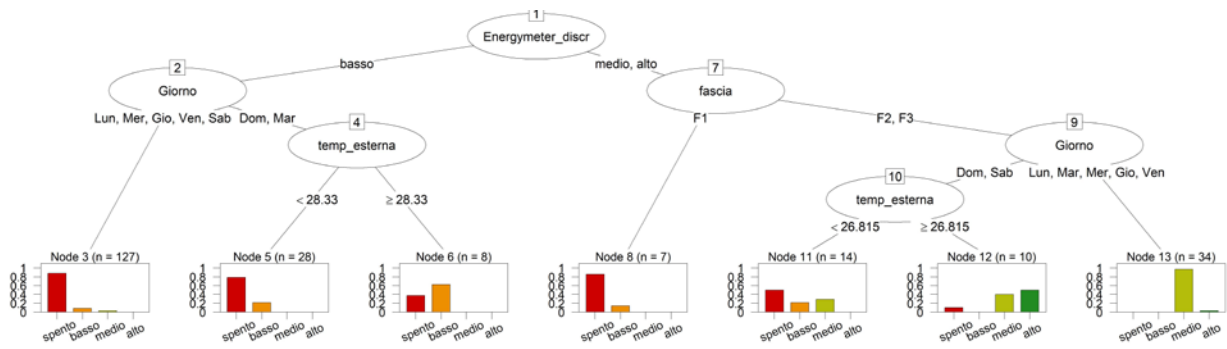


Figura 40 C7: CART per caratterizzare i consumi dei condizionatori dell'edificio

Da questa caratterizzazione si evince che l'utilizzo del condizionatore si riferisce prevalentemente ad alcuni giorni e fasce orarie tipiche, ottenendo livelli diversi in base alla temperatura esterna.

#### 4.2.6 Edificio C9 (Aggregatore 2)

L'edificio C9 ha due condizionatori installati, collegati entrambi allo stesso dispositivo di monitoraggio, riuscendo quindi a tenere traccia di ogni consumo di climatizzazione estiva.

Nella Figura 41 si può notare come l'utilizzo dei condizionatori presenti non è molto frequente come in C7 e legato a giorni solitamente vicini tra loro.

I consumi assumono valori anche molto diversi tra loro, però la loro frequenza di occorrenza è molto bassa, dunque l'algoritmo ha discretizzato i valori presenti in soli due livelli per entrambe le variabili, come mostrato in Figura 42.

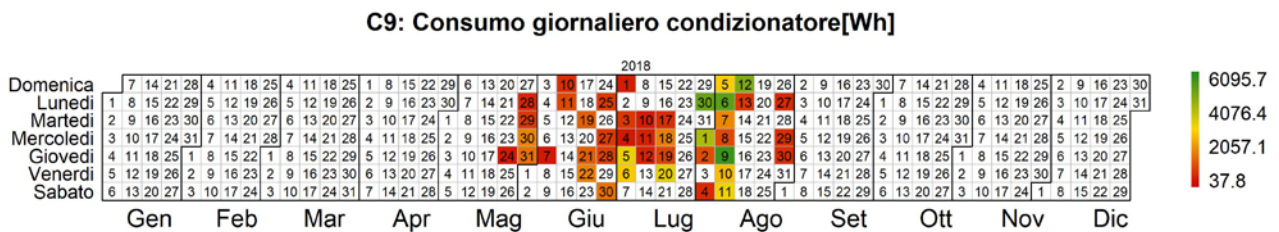


Figura 41 C9: Calendar plot consumi giornalieri

I consumi più alti di conseguenza risultano come consumi molto infrequenti e dispersi, che sono stati caratterizzati in modo univoco con un CART. I consumi dei condizionatori sono responsabili di un alto consumo globale quando la temperatura esterna è superiore ai 27°C, mentre se la temperatura è al di sotto di questa soglia, il condizionatore è solitamente spento.

Per quanto riguarda i consumi globali bassi, i valori di consumo dei condizionatori corrispondenti sono di livello "basso", nel caso in cui la temperatura esterna risulta più alta, mentre risultano nulli negli altri casi.

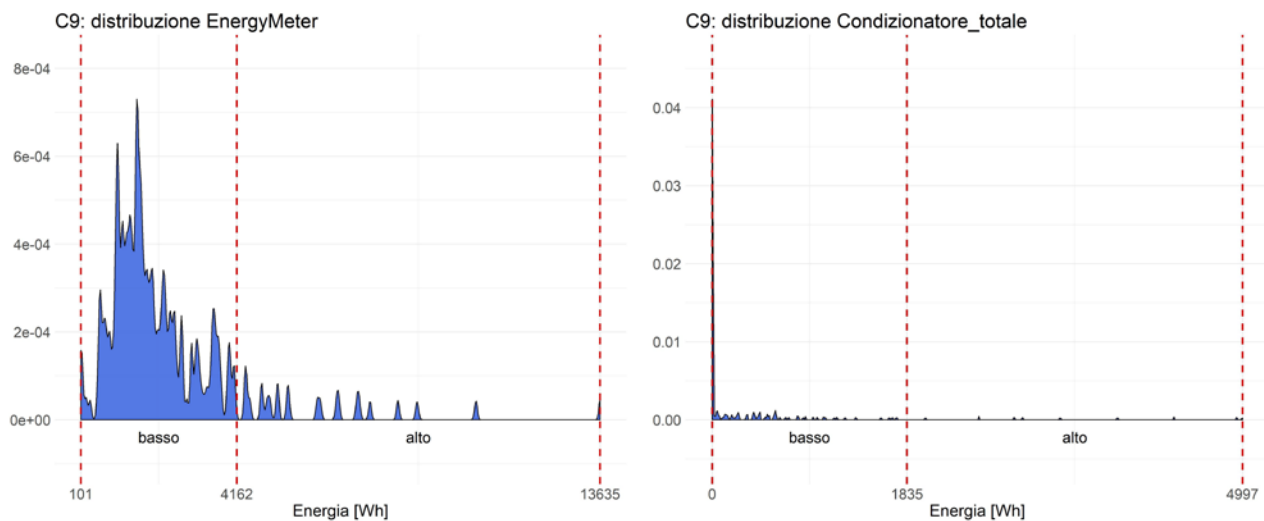


Figura 42 C9: distribuzione consumi

A causa della scarsa caratterizzazione del consumo basso l'errore di classificazione commesso è più alto rispetto agli altri e pari al 23%.

I valori di consumo sono distribuiti in modo tale da non permettere una caratterizzazione più chiara dei consumi taggati come bassi, poiché il CART non riesce a trovare uno schema che possa descrivere l'utilizzo dei condizionatori.

#### 4.2.7 Discussione

L'utilizzo di questa metodologia ha permesso di individuare in modo automatico le correlazioni tra le variabili, identificando il *range* di valori delle variabili di *input* che caratterizzano i livelli di consumo determinati nella variabile di *output*. In questo modo, è stato identificato il *range* di valori di temperatura esterna che è più facilmente associato all'accensione degli impianti di condizionamento per ognuna delle abitazioni a parità di fascia oraria, giorno della settimana e consumo elettrico generale.

Il numero di *split* effettuati, quindi il numero di variabili considerate per la divisione dei dati, risulta differente per i diversi casi considerati, in quanto dipende dal numero di dati utili disponibili. Infatti, con un alto numero di dati che si riferiscono all'utilizzo dei condizionatori è possibile trovare più facilmente anche correlazioni con più variabili.

Di conseguenza, la caratterizzazione dei consumi elettrici ha portato alla definizione, per i casi piloti C2017, delle condizioni ricorrenti che determinano diversi livelli di consumo elettrico degli impianti di climatizzazione, identificando inoltre anche gli intervalli di temperatura tipici in cui gli impianti vengono utilizzati. In questo modo sono state individuate possibili preferenze degli occupanti ed evidenziate eventuali criticità nell'utilizzo degli impianti presenti. In alcuni casi non è stato possibile caratterizzare con chiarezza i dati a disposizione, però il CART costruito riesce a identificare le variabili che influenzano maggiormente i consumi dei condizionatori presenti.

## 5 Analisi di benchmarking

Descritte le caratteristiche delle abitazioni in termini di qualità termo-igrometrica (Sezione 3) e consumi energetici (con focus sul condizionamento estivo, Sezione 4) tramite rappresentazioni di statistica descrittiva e tecniche di *Data Analytics*, l'obiettivo dello studio consiste nel provvedere analisi diagnostiche delle abitazioni E2016 e C2017 rispetto a quelle stesse tematiche.

Una delle possibili tecniche di diagnostica consiste nel *benchmarking*, ossia nel misurare la qualità dell'oggetto dell'analisi, che nello specifico di questo studio è l'insieme delle abitazioni pilota, tramite la sua comparazione con valori di riferimento oppure con valori calcolati sull'oggetto dell'analisi.



L'obiettivo è l'individuazione delle grandezze secondo le quali misurare la qualità delle abitazioni, in termini di consumi e parametri ambientali (che rappresentano le tematiche dello studio riferito in questo report) e la contestuale ricerca dei valori di riferimento definiti come valori di *benchmark* rispetto ai quali confrontare gli oggetti del campione, cioè le abitazioni. Mentre la prima questione rende necessaria l'individuazione di indicatori di performance (detti in letteratura *key performance indicators* o KPIs), la seconda può prevedere due casistiche. Infatti, i valori di riferimento possono essere esterni al campione di analisi, per esempio assunti da standard, per cui si parla di *benchmark* esterno, oppure calcolati sul campione stesso, per cui si parla di *benchmark* interno.

Per ciascuna delle aree di indagine trattate nel report, cioè le caratteristiche ambientali monitorate, i consumi totali da bollette e i consumi di climatizzazione estiva monitorati, sono stati individuati dei KPIs. La tabella seguente riporta i KPIs scelti per lo studio di *benchmarking*, i quali quindi devono avere la caratteristica, una volta calcolati per le varie abitazioni, di renderle tra loro confrontabili.

**Tabella 23** Elenco degli indicatori di performance (KPIs) individuati per lo studio di benchmarking.

Area	Nome	Descrizione	Unità di misura	Fonte	Applicazione
Ambiente interno	<b>Giornate di comfort termico</b>	Percentuale di giornate con dato di temperatura interna media giornaliera entro le diverse classi di comfort da UNI EN 15251 su totale delle giornate monitorate.	[%]	Dati monitorati	E3 (due ambienti), E8 (due ambienti), E9 (due ambienti), C1 (1 ambiente), C3 (1 ambiente), C7 (1 ambiente).
	<b>Giornate di comfort igrometrico</b>	Percentuale di giornate con dato di umidità relativa interna media giornaliera entro le diverse soglie sul totale delle giornate monitorate.	[%]	Dati monitorati	E3 (due ambienti), E8 (due ambienti), E9 (due ambienti).
Consumi totali	<b>CT/m<sup>2</sup> Consumo termico al metro quadro</b>	Consumo finale di energia per usi termici (riscaldamento, acqua calda sanitaria e cucina) sulla superficie dell'abitazione.	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	Elaborazione da bollette, noti i metri quadri	E2016 (tutti, di cui due accorpati), C2017
	<b>CE/occ. Consumo elettrico per occupante</b>	Consumo elettrico diviso per numero di occupanti.	[kWh/occ. anno]	Elaborazione da bollette, noti gli occupanti	E2016 (tutti, di cui due accorpati), C2017



	<b>EP<sub>tot</sub>/m<sup>2</sup></b> <b>Consumo primario al metro quadro</b>	Consumo di energia primaria totale (inclusi tutti gli usi) sulla superficie dell'abitazione.	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	Elaborazione da bollette, noti i metri quadri	E2016 (tutti, di cui due accorpati), C2017
	<b>Euro/ occ.</b> <b>Costo energia a occupante</b>	Costo dell'energia (inclusi tutti gli usi) su numero di occupanti.	[€/occ. anno]	Elaborazione da bollette, noti gli occupanti	E2016 (tutti, di cui due accorpati), C2017
	<b>Emiss/ m<sup>2</sup></b> <b>Emissioni al metro quadrato</b>	Emissioni di anidride carbonica equivalente dovute al consumo di energia (inclusi tutti gli usi) sulla superficie dell'abitazione.	[kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>2</sup> anno]	Elaborazione da bollette, noti i metri quadri	E2016 (tutti, di cui due accorpati), C2017
	<b>Potenza termica</b>	Consumo di gas su tempo	[kW]	Da bollette, noto il tempo al quale si riferiscono	C2017 (C1, C2)
<b>Consumi di climatizzazione</b>	<b>Consumo elettrico al metro quadrato</b>	Energia elettrica consumata riferita alla superficie degli ambienti raffrescati	[kWh/m <sup>2</sup> anno]	Dati monitorati	C2017 (C1, C3, C5, C6, C7, C9)
	<b>Ore condizionatore</b>	Sommatoria delle ore di funzionamento dei condizionatori presenti	[h]	Dati monitorati	C2017 (C1, C3, C5, C6, C7, C9)
	<b>Giorni di funzionamento</b>	Percentuale di giorni in cui c'è stato un utilizzo del condizionatore	[%]	Dati monitorati	C2017 (C1, C3, C5, C6, C7, C9)

Gli indicatori riportati in Tabella 23 sono stati calcolati per tutte le abitazioni per le quali il loro calcolo fosse applicabile (come specificato nella tabella stessa) e utilizzati per confrontare le abitazioni tra di loro (*benchmark* interno) e rispetto a valori di riferimento da letteratura o da standard (*benchmark* esterno)

quando disponibili. I risultati di tale analisi diagnostica sono restituiti di seguito per le tre sezioni tematiche affrontate nello studio e già nominate nella tabella sovrastante: parametri dell'ambiente interno, consumi totali e consumi di climatizzazione.

A supporto di una maggior comprensione degli oggetti dell'analisi utile all'interpretazione dei risultati ottenuti dall'analisi di *benchmark*, altre tecniche sono state introdotte. In particolare, sono state calcolate, per le varie abitazioni, alcune variabili intrinseche (per esempio il loro rapporto di forma S/V), e sono stati generati degli alberi decisionali, aventi come variabile di uscita la classe di consumo per la climatizzazione (ottenuta da preventiva discretizzazione dei dati di consumo stessi), utili ad una migliore descrizione degli oggetti dell'analisi. Oltre alla caratterizzazione dei dati, è stato costruito uno strumento che permettesse di perpetrare l'analisi di *benchmark* interno anche a valle di ulteriore acquisizione di dati di monitoraggio. Infatti, di seguito viene introdotto un modello di regressione lineare quale possibile tecnica di previsione dei consumi, potenzialmente utile per estendere nel tempo la diagnostica di queste abitazioni, tramite il confronto dei loro futuri consumi monitorati con un *benchmark* interno costruito sul loro storico dal modello di regressione.

- E2016 e C2017 – parametri ambientali

L'indicatore di performance relativo alla qualità termica dell'ambiente interno è stato calcolato sia per le abitazioni E2016 che per le C2017, mentre quello di qualità igrometrica solo per E2016, in quanto nelle abitazioni della sperimentazione C2017 l'umidità relativa non è monitorata, dunque l'indicatore non è applicabile.

In particolare, per i due ambienti di E3, E8 ed E9 che sono stati oggetto del presente studio (in quanto caratterizzati dal database migliore, come discusso in Sezione 2.1) sono state calcolate temperatura e umidità relativa interne medie giornaliere per le giornate aventi più di 20 record, e in che percentuale tali giornate appartenessero a quattro classi di comfort termico e di comfort igrometrico sulla totalità delle giornate monitorate. L'analisi è stata condotta separatamente per la stagione estiva 2017 (monitorata in E8 ed E9) e per quella invernale 2017-2018 (monitorata in E3, E8 ed E9), secondo i confini descritti nelle precedenti sezioni del report (Sezione 2.1).

Anche per gli ambienti climatizzati delle abitazioni C1, C3 e C7 è stata calcolata la temperatura interna media giornaliera per le giornate aventi più di 20 record, e in che percentuale tali giornate appartenessero a quattro classi di comfort termico sulla totalità delle giornate monitorate. I dati sono relativi all'estate 2018, secondo i confini descritti nelle precedenti sezioni del report (Sezione 2.1).

Le classi di comfort termico e di comfort igrometrico sono state così definite:

**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*)

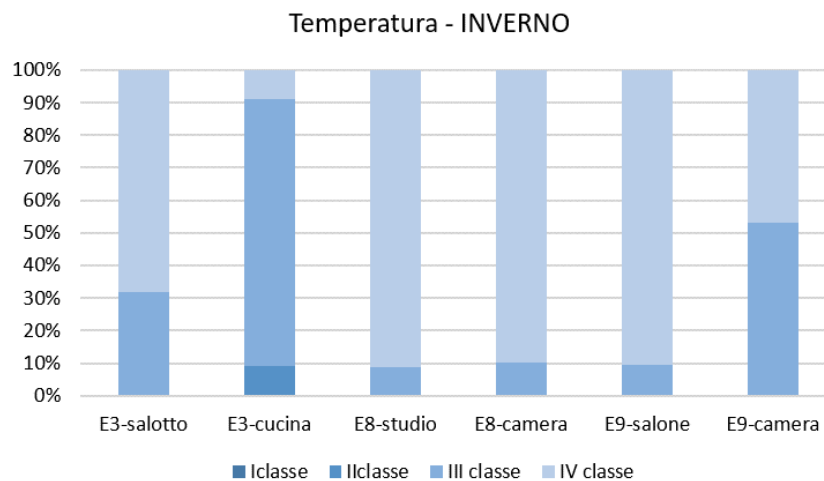
**UR\_Inverno:**

- **Classe I**  $\leq 50\%$
- **Classe II**  $\leq 50\%$
- **Classe III**  $\leq 70\%$
- **Classe IV**  $> 70\%$  (*discomfort*)

**UR\_Estate:**

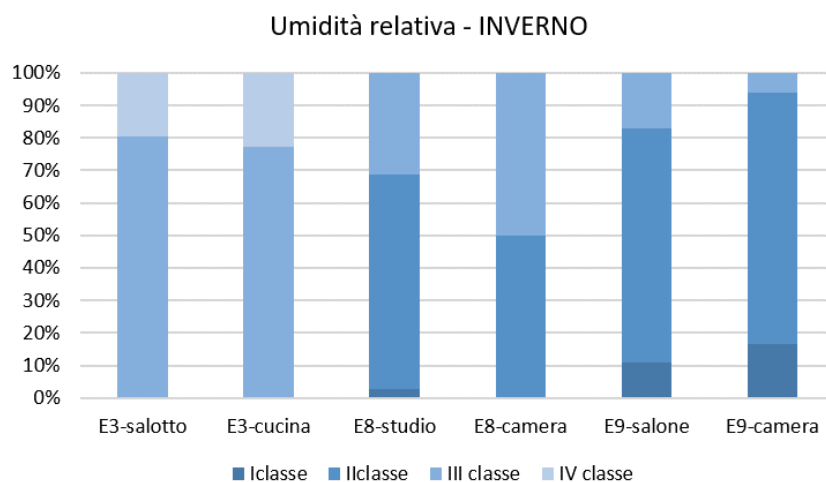
- **Classe I**  $\leq 50\%$
- **Classe II**  $\leq 50\%$
- **Classe III**  $\leq 70\%$
- **Classe IV**  $> 70\%$  (*discomfort*)

I grafici di seguito mostrano i risultati ottenuti. Questi ultimi non sono stati plottati insieme per E2016 e C2017 in quanto i dati monitorati di tali due gruppi di abitazioni non sono relativi allo stesso periodo, come discusso nella sezione del presente report dedicata all'analisi del data-set (Sezione 2.1). Nei grafici seguenti "n" è il numero di record sulla base dei quali è stata condotta l'analisi da essi rappresentata.



$n(E3) = 66-66$ ;  $n(E8) = 151-148$ ;  $n(E9) = 64-66$

**Figura 43** E2016\_Percentuale di giornate invernali sulla totalità delle giornate monitorate (n) nelle quali il dato di temperatura interna media giornaliera entra nei limiti delle classi di comfort termico.



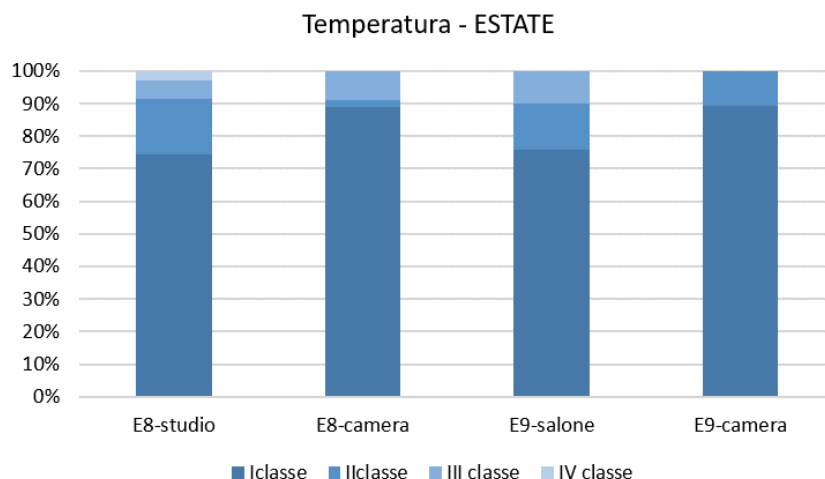
$n(E3) = 66-66$ ;  $n(E8) = 151-148$ ;  $n(E9) = 64-66$

**Figura 44** E2016\_Percentuale di giornate invernali sulla totalità delle giornate monitorate (n) nelle quali il dato di umidità relativa interna media giornaliera entra nei limiti delle classi di comfort igrometrico.

Tali rappresentazioni consentono di raffrontare la differente qualità termo-igrometrica delle abitazioni sulla base del confronto dei dati monitorati con dei valori di *benchmark* esterni, i quali consistono nelle soglie fissate per le classi di comfort termico e igrometrico riportate sopra. Le figure riportate in questa sezione (Figura 43- Figura 47) consentono di leggere in modo immediato la quota di giornate sul totale di quelle monitorate nelle quali negli ambienti interni delle abitazioni E2016 e C2017 non sono risultati soddisfatti i requisiti di comfort termo-igrometrico (classe IV), e la quota nelle quale invece essi sono stati raggiunti (classi I, II e III). Di questo secondo gruppo di giornate è anche possibile vedere come esse siano distribuite nelle tre classi di comfort (I, II e III), dove la classe I è quella ottimale.

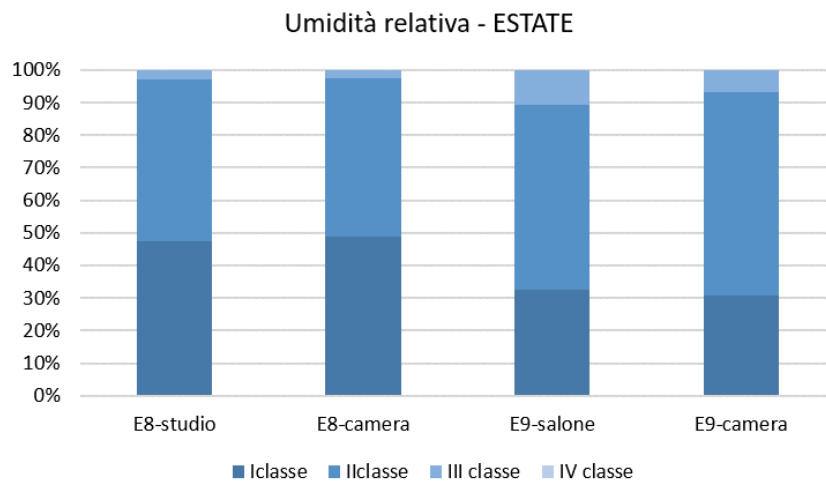
In Figura 43 è possibile osservare come in inverno la qualità termica degli ambienti analizzati in E2016 sia generalmente modesta, in quanto per la maggior parte delle giornate il dato di temperatura interna media giornaliera è inferiore ai 18°C. In particolare, l'abitazione dalla qualità termica invernale peggiore è E8, i cui due ambienti climatizzati sono per il 90% delle giornate in classe di discomfort (classe IV). Lo stesso avviene nella zona giorno dell'abitazione E9. Mentre gli occupanti di E8 sono pendolari, dunque non occupano l'abitazione nelle ore diurne, quelli di E9 sono pensionati, dunque dovrebbero preferire un'accensione degli impianti più frequente, dal momento che occupano spesso la casa. Infatti, nella camera di E9 la qualità

termica è migliore, garantendo per il 50% delle giornate invernali una temperatura superiore ai 18°C ma inferiore ai 20°C. Nella zona giorno le temperature restano piuttosto basse. La modesta qualità termica raggiunta in questi ambienti potrebbe essere imputata alle caratteristiche dell'involucro. Infatti, E8 ed E9 occupano due piani di uno stesso edificio costruito tra gli anni '80 e i primi anni '90, che perciò è quasi sicuramente molto disperdente in quanto probabilmente sprovvisto di isolamento. Anche in E3 non si raggiungono condizioni di comfort molto frequentemente: solo nel 30% delle giornate le temperature medie giornaliere della zona giorno superano i 18°C, restando comunque inferiori ai 20°C. Il profilo di occupazione di questa abitazione è simile a quello di E8, essendo entrambe abitate da una coppia pendolare con unico figlio, ma la qualità termica della zona giorno, a parità di occupazione giornaliera, è migliore in E3 che in E8. Difficilmente questo è da imputarsi ad una maggiore qualità dell'involucro, in quanto anche E3 occupa un edificio costruito negli anni del boom edilizio (anni '70 e '80) ed è dunque quasi sicuramente non isolato e di scarsa qualità edilizia. A garantire il raggiungimento più frequente del comfort è probabilmente l'uso degli impianti, come viene confermato da un dato di consumo medio annuale al metro quadro più alto (come è discusso più avanti). Gli abitanti di E3 preferiscono mantenere calda la cucina, che solo nel 10% delle giornate ha un dato di temperatura interna media inferiore ai 18°C. Questa è l'unico ambiente tra tutti quelli analizzati in E2016 che raggiunga la classe di comfort II, cosa che avviene nel 9% dei casi. In Figura 44 si osserva come la qualità igrometrica sia generalmente più facilmente raggiunta nelle stesse giornate per le abitazioni E2016. E' proprio E3 questa volta ad avere la peggior qualità igrometrica, poiché il dato di umidità relativa media giornaliera spesso eccede la soglia raccomandata. Questo è in parte dovuto alla natura degli ambienti monitorati (come la cucina, più umida per via della sua destinazione d'uso), ma probabilmente anche ad una minore attitudine alla ventilazione degli ambienti o ad una più scarsa permeabilità al vapore dell'involucro che, data l'epoca di costruzione, sarà quasi certamente prevalentemente in calcestruzzo. La qualità del data-set non ha reso possibile replicare le stesse considerazioni a partire dal dato medio orario, che sarebbe stato più significativo delle preferenze termiche degli occupanti, ma gli andamenti giornalieri analizzati nelle precedenti sezioni di questo report (Sezione 3) possono confermare che, in alcuni giorni tipo ricadenti nella stagione invernale, le temperature raggiunte all'interno delle abitazioni E2016 non sono mai molto alte. Nei grafici seguenti "n" è il numero di record sulla base dei quali è stata condotta l'analisi da essi rappresentata.



$n(E3) = 105-110$ ;  $n(E8) = 111-102$

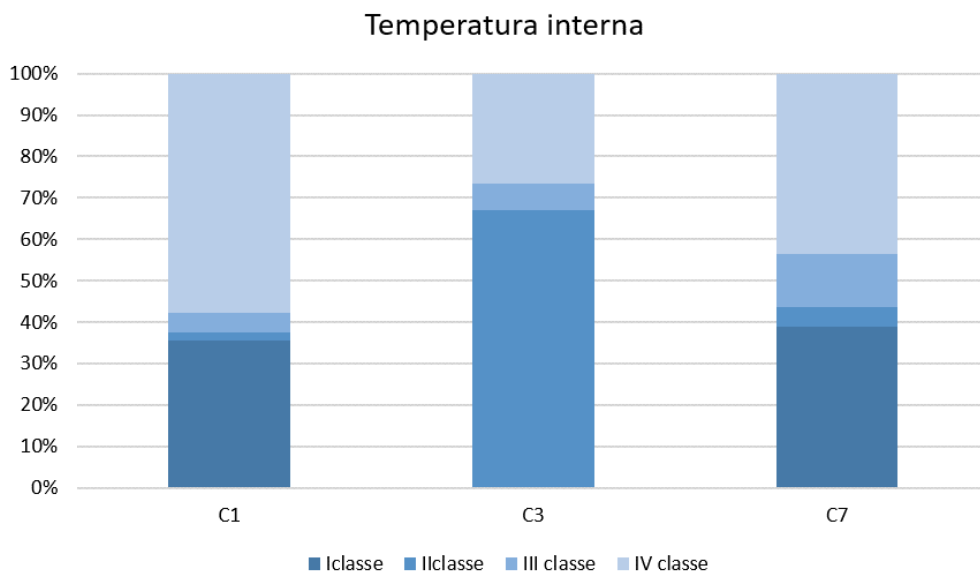
**Figura 45** E2016\_Percentuale di giornate estive sulla totalità delle giornate monitorate (n) nelle quali il dato di temperatura interna media giornaliera entra nei limiti delle classi di comfort termico.



$n(E3) = 105-115$ ;  $n(E8) = 111-101$

**Figura 46** E2016\_Percentuale di giornate estive sulla totalità delle giornate monitorate (n) nelle quali il dato di umidità relativa interna media giornaliera entra nei limiti delle classi di comfort igrometrico.

Come si può osservare invece in Figura 45 e Figura 46, in estate, negli stessi ambienti delle abitazioni E2016 (a meno di E3, il cui data-set non copre la stagione estiva) è la qualità igrometrica ad essere più difficile da soddisfare. Infatti, in tutti gli ambienti analizzati, per almeno il 78% delle giornate, il dato di temperatura interna media giornaliero soddisfa la soglia di comfort relativa alla classe I, cioè la temperatura non supera i 25,5 °C. Complice di questo dato il fatto che anche le temperature esterne non abbiano raggiunto picchi molto elevanti nell'anno 2017. Allo stesso tempo però un'analisi del dato medio orario avrebbe permesso di rilevare alcune criticità che su base giornaliera non possono essere osservate, come le forti escursioni, parzialmente osservate in Sezione 3.1. In generale dunque la qualità termica è buona in entrambe le abitazioni, tra le quali migliore sembra essere E9, che nella camera ha temperature sempre inferiori a 26°C (classe II, o classe I quando scende al di sotto dei 25,5°C), mentre E8 si comporta peggio, poiché nella camera nel 3% dei casi si raggiunge una situazione di discomfort (classe IV). I due ambienti (il migliore e il peggiore) hanno esposizione opposta (lo studio di E8 è esposto a est, mentre la camera di E9 a ovest). Mentre la classe I di qualità termica è molto frequentemente raggiunta nel periodo monitorato, lo stesso non è vero per quella di qualità igrometrica. Comunque, un'ottima qualità igrometrica è raggiunta almeno nel 35% delle giornate per tutti gli ambienti monitorati, e il discomfort (classe IV) non occorre mai. In generale è l'abitazione E8 (occupante il piano superiore della villetta nella quale sono collocate le due abitazioni oggetto di analisi) ad avere qualità igrometrica migliore tra le due. Nei grafici seguenti "n" è il numero di record sulla base dei quali è stata condotta l'analisi da essi rappresentata.



n(C1) = 105; n(C3) = 109; n(C7) = 109

**Figura 47** C2017\_Percentuale di giornate estive sulla totalità delle giornate monitorate (n) nelle quali il dato di temperatura interna media giornaliera entra nei limiti delle classi di comfort termico.

Tramite la rappresentazione offerta in Figura 47 è possibile fare simili considerazioni per le abitazioni C1, C3 e C7 appartenenti alla sperimentazione C2017. Come già detto, ci si è concentrati sugli ambienti monitorati e climatizzati, sia per necessità dettate dalla qualità del data-set, sia per mantenersi in linea con gli scopi del lavoro.

In Figura 47 si osserva che, nell'estate 2018 (entro i limiti temporali descritti in precedenza in questo report), è stata l'abitazione C3 ad evitare più spesso le condizioni di discomfort termico (classe IV). Esse infatti sono evitate nel 71% dei casi, mentre in C1 e C7 lo sono solo nel 40% e 53% delle giornate, rispettivamente. Allo stesso tempo però C3 è l'unica abitazione a non raggiungere mai delle situazioni di comfort ottimali, corrispondenti alla classe I. Quest'ultima corrisponde ad una temperatura inferiore o uguale ai 25,5°C, condizione che viene invece soddisfatta, in termini di dato medio giornaliero, in C1 (37% delle giornate) e in C7 (42%). Come per E2016, anche in questo caso questa informazione va letta insieme alle conoscenze ottenute tramite le restanti analisi condotte in questo studio. Infatti, esse hanno reso possibile conoscere come C3 usi il condizionatore per un numero di ore medie giornaliere inferiore rispetto a C1 e C7, consumando meno (come verrà discusso in seguito). Quest'ultimo dato è confermato anche dal dato di consumo elettrico da bolletta: nei mesi estivi la spesa energetica assoluta di C3 è la metà di quella di C7, il quale ha il più alto numero di ore di accensione degli *split* monitorati. L'estrazione di conoscenza dai dati di climatizzazione provenienti da monitoraggio ha consentito di rilevare come C1 usi per meno tempo gli *split* rispetto a C7, ma con un consumo al metro quadro maggiore: questo risulta in un numero di giornate in comfort ottimale (classe I) percentualmente simile tra le due abitazioni, ma con una spesa energetica maggiore per C1, il quale più raramente si mantiene in classi di comfort intermedie (classe II e III), preferendo, quando non è in discomfort, garantire quelle ottimali (classe I). Questo non è da imputarsi solo ad una peggiore gestione dell'impianto, ma anche al fatto che C7 sia un edificio recente, contrariamente a C1, che risale alla prima metà del '900. Per contro C3, abitazione che occupa un edificio degli anni '60-'70, si può dire che rinunci a livelli di comfort ottimali a fronte però di una spesa energetica minore.

- E2016 e C2017 – consumi totali

Gli indicatori di performance relativi ai consumi totali sono stati calcolati sia per le abitazioni E2016 che per le C2017 a partire dai dati di bolletta.

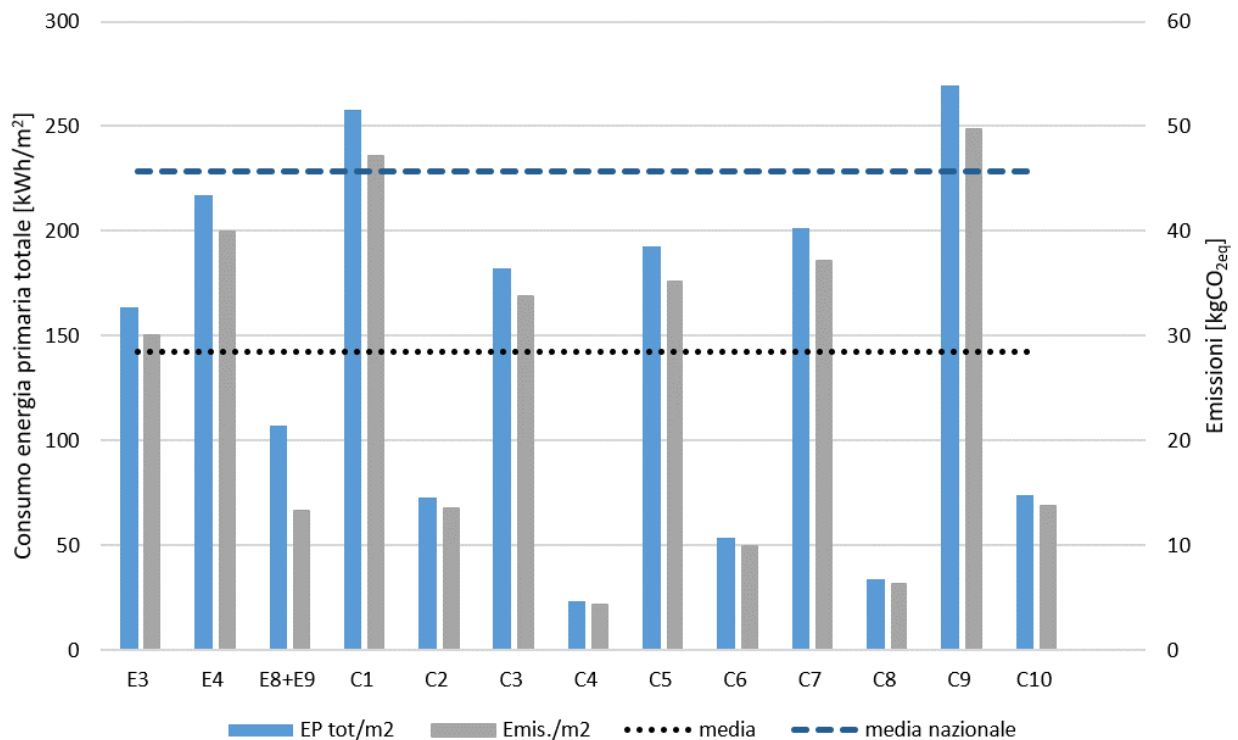
In particolare, per le abitazioni E2016 sono stati considerati dei consumi medi al 2015, mentre per gli edifici di C2017 ci si è riferiti ai dati da bolletta del 2017, come descritto in sezione 2.1 di questo report.

Il calcolo dei consumi di energia primaria totale, è stato condotto a partire dai dati di consumo finale, moltiplicati per gli opportuni fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici, così come fissati dalla normativa D.M. 26/06/2015, “Requisiti minimi” [10]. I fattori per i quali sono stati moltiplicati i diversi consumi finali per conoscere l’emissione di anidride carbonica equivalente imputabile ad essi sono riportati di seguito, insieme ai coefficienti di conversione in energia primaria.

**Tabella 24** Coefficienti di conversione in energia primaria e fattori di emissione per vettore energetico

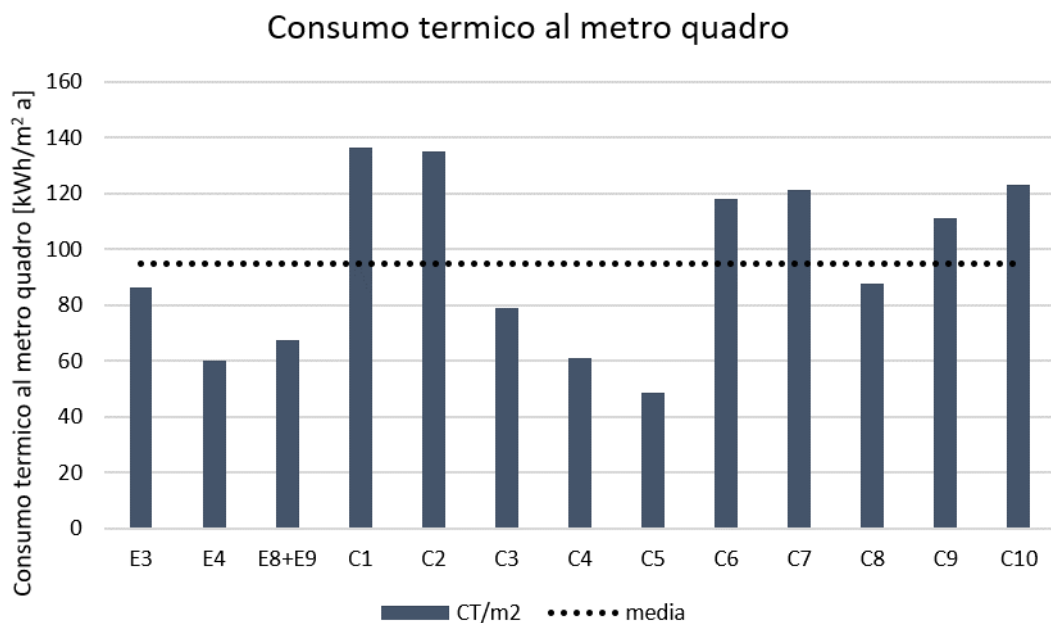
	Coeff. Energia primaria totale [-]	Coeff. Energia primaria rinnovabile [-]	Fattore di emissione di CO <sub>2</sub> eq [kg/kWh]
<b>Energia Elettrica dalla rete</b>	2,42	0,47	0,4332
<b>Gas naturale</b>	1,05	0	0,1969
<b>Pellet</b>	1	0,8	0
<b>Legna</b>	1	0,8	0

I risultati così ottenuti sono stati raffrontati con valori di *benchmark* sia esterni che interni, come riportato nei grafici sottostanti.

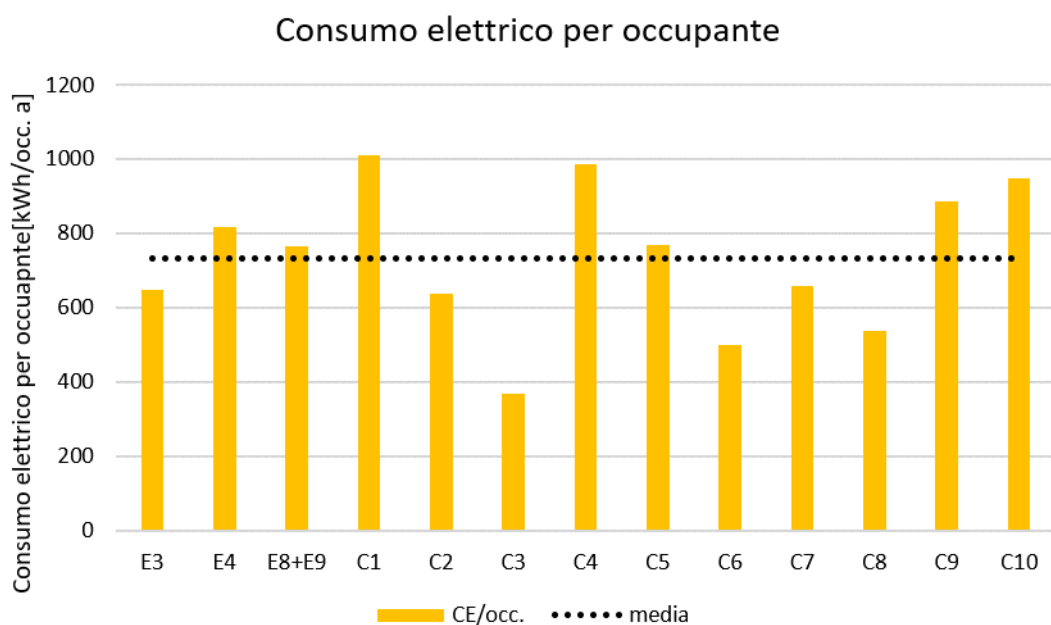


**Figura 48** Consumi annui di energia primaria totale e emissioni al metro quadro per ciascuna abitazione e loro raffronto con media nazionale (*benchmark* esterno) e media del campione (*benchmark* interno).

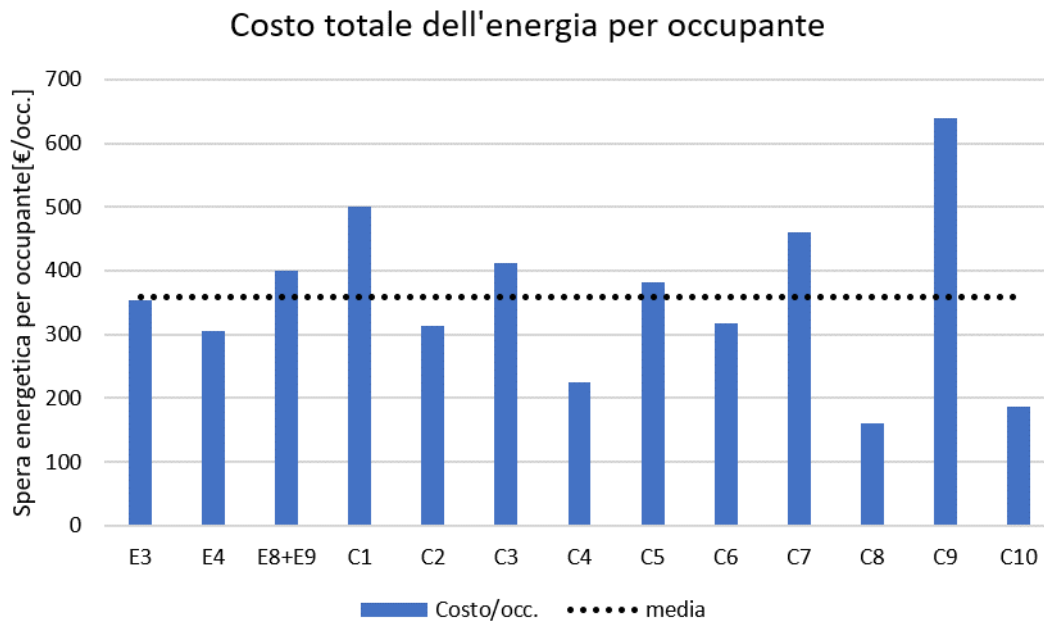




**Figura 49** Consumi annui di energia termica al metro quadro per ciascuna abitazione e loro raffronto con media del campione (*benchmark* interno).



**Figura 50** Consumi annui di energia elettrica per occupante per ciascuna abitazione e loro raffronto con media del campione (*benchmark* interno).



**Figura 51** Spesa energetica ad occupante per ciascuna abitazione e suo raffronto con media del campione (*benchmark* interno).

Tali rappresentazioni consentono di raffrontare la differente prestazione energetica delle abitazioni sulla base del confronto dei dati da bolletta con un valore di *benchmark* esterno [11], il quale consiste nella media di consumo nazionale, e con la media delle prestazioni delle abitazioni stesse (*benchmark* interno) [12].

Come si può osservare in Figura 49, l'abitazione dai consumi termici minori è C5, che è l'unica a non impiegare il gas anche per il servizio di produzione di acqua calda sanitaria, per la quale è presente una pompa di calore. Infatti, come si può osservare in Figura 50, il suo consumo elettrico è al di sopra della media. Delle abitazioni E2016, E3, avendo una caldaia tradizionale, consuma più di E4, che ne ha una a condensazione, ma anche più di E8+E9, poiché esse integrano i servizi termici con fonti rinnovabili (biomassa per il riscaldamento e solare per ACS). Tra la totalità del campione, le abitazioni aventi un consumo termico al metro quadro al di sopra della media interna sono C1, C2, C6, C7, C9 e C10. Per contro, escluso C5 per il motivo detto sopra, è C3 a consumare meno. Questo è imputabile al fatto che tale abitazione sia occupata da un lavoratore pendolare, quindi spesso fuori casa. Seguono, in ordine, C4 e C8. Entrambe le abitazioni sono appartamenti in edifici costruiti tra gli anni '60 e '70. Il maggior consumo in capo a C8 è dovuto sia ad una più frequente occupazione dell'abitazione, sia al fatto che essa, contrariamente a C4, non abbia visto un recente intervento di sostituzione degli infissi. Tra i maggiori consumatori ci sono non a caso le due abitazioni in ville unifamiliari o bifamiliari (C2 e C6), aventi tipicamente un rapporto tra superficie disperdente e volume riscaldato (S/V) più alto, in quanto meno compatte. Le altre (C1, C7, C10, C9, in ordine decrescente di consumo termico), si differenziano per epoca e occupazione, ma sono tutti appartamenti in edifici plurifamiliari. C1 risulta essere la più energivora probabilmente per via del suo alto rapporto di forma S/V (cioè il rapporto tra la superficie disperdente e il volume riscaldato). Si tratta inoltre di un edificio vecchio, il quale ha visto una sostituzione dei serramenti, avendo però rapporto tra superficie vetrata e superficie opaca molto piccolo. C7 e C10 hanno simile rapporto di forma S/V e consumi comparabili. Essendo C7 più recente di C10, ci si aspetterebbe dalla prima una performance migliore. Tuttavia, C10, abitata da due lavoratori pendolari, è molto meno occupata, quindi ha minori consumi ad essa imputabili. C9 è un edificio risalente al boom edilizio che ha avuto solo una parziale sostituzione dei serramenti in anni non molto recenti. Il suo rapporto di superficie vetrata su superficie opaca è piuttosto alto, perciò quest'ultimo fatto potrebbe fortemente influenzare i suoi consumi termici, che risultano di conseguenza piuttosto alti.

In Figura 48 si può vedere come, quando si parla di energia primaria totale, le abitazioni con prestazioni minori già individuate osservando i consumi termici, in particolare C1, C7 e C9, siano quelle più vicine ai consumi medi nazionali. C5 risulta penalizzata in termini di consumi primari, in quanto usa l'energia elettrica

per il servizio di produzione di acqua calda sanitaria. Per lo stesso motivo i suoi consumi elettrici e il costo dell'energia ad essa associati sono sopra alla media del campione, come si osserva in Figura 50 e Figura 51. In generale le abitazioni che migliorano il loro ranking rispetto alle altre quando si parla di energia primaria totale, sono quelle che, sulla totalità dell'energia finale consumata, hanno una quota elettrica più bassa. Andando però ad osservare il consumo elettrico ad occupante (indicatore assai più rilevante rispetto allo stesso consumo rapportato al metro quadro di abitazione), in Figura 50 si nota come C1, C4, C10, C9 e C5 siano quelle dal consumo ad occupante al di sopra della media, in ordine decrescente di consumo specifico. Mentre C1, C5, C9 e C10 risultano avere un alto consumo elettrico in termini assoluti, C4, in termini specifici, supera C6 e C7, che avrebbero degli alti consumi assoluti (come suggerisce la loro maggiore spesa evidenziata in Figura 51), in quanto si tratta di un diverso profilo di occupazione: non una famiglia, ma un lavoratore che, vivendo solo, avrà abitudini di consumo differenti, oltre ad avere ovviamente un'intensità di consumo per persona più alta. Rispetto ai consumi di climatizzazione che, insieme alla qualità ambientale, rappresentano il tema centrale di questo studio, occorre dire che i maggiori consumatori di energia elettrica sono anche quelli che dispongono di climatizzazione estiva. Il profilo d'uso di questo servizio che le diverse tipologie di occupanti adottano si riflette negli indicatori leggibili nei grafici sovrastanti, ma soprattutto ha un impatto sulla qualità termica dell'ambiente interno, come già discusso in precedenza e ripreso nella successiva sezione del report dedicata alla climatizzazione.

Gli indicatori fino a qui discussi si rivelano quindi adatti a fare diagnostica tramite analisi di *benchmarking*, in quanto la loro lettura porta alla luce criticità e potenzialità di gestione e controllo energetico nelle abitazioni. Accanto ad essi, risulta particolarmente interessante quello di spesa energetica ad occupante (Figura 51), in quanto, essendo facilmente comprensibile, rappresenta una leva forte nell'indurre un cambio di comportamento negli occupanti delle abitazioni analizzate verso atteggiamenti più responsabili.

A livello metodologico, un'altra possibile tecnica di diagnostica consisterebbe nel raffronto degli indicatori calcolati per ciascuna abitazione con il loro storico. Tale analisi rappresenta un ulteriore caso di *benchmark* interno, e dà delle informazioni su come l'abitazione si sta comportando non rispetto alle altre abitazioni, ad uno standard o ad una media nazionale, ma rispetto a sé stessa, aprendo ulteriori possibilità di rilevare inefficienze nel sistema e migliorarne la gestione. Una possibile applicazione consiste nel raffronto tra i dati di consumo che verranno monitorati in queste abitazioni con il dato previsto da modello di regressione, costruito sullo storico dei consumi, come proposto nel seguito.

In ultimo, sempre relativamente ai consumi delle abitazioni, inefficienze del sistema possono essere valutate anche attraverso il metodo della firma energetica. Essa è costruita studiando quella che dovrebbe essere la relazione lineare tra la potenza termica fornita dall'impianto e la temperatura esterna media. A seconda del fenomeno che si vuole spiegare, la scala temporale dei dati di input può essere differente. Di seguito viene riportato un esempio di calcolo svolto su base mensile per due delle abitazioni di C2017.

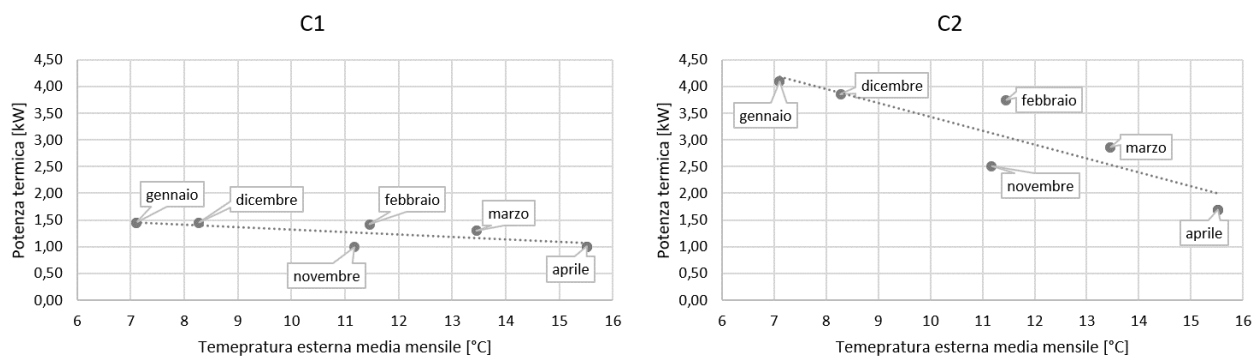


Figura 52 Esempio di firma energetica per due abitazioni di C2017.

I due grafici sopra riportati evidenziano la relazione tra la potenza termica (calcolata come consumo mensile di gas naturale da bolletta diviso le ore costituenti il periodo al quale le bollette stesse fanno riferimento) e il dato di temperatura esterna media riferita allo stesso periodo (calcolata da dati monitorati da stazioni

climatiche limitrofe [4]). Nel caso specifico non è possibile osservare un rapporto lineare perfetto tra le due variabili, poiché la scala temporale scelta, obbligata dal tipo di dato a disposizione, non ha una granulometria sufficientemente alta. Il metodo resta un valido strumento diagnostico e, nel caso mostrato in Figura 52, evidenzia già come, a parità di temperature esterne medie mensili, la potenza termica necessaria a C2 sia più che doppia che in C1, pur avendo entrambe le abitazioni impianto di riscaldamento autonomo, costituito da caldaia a gas, ed essendo entrambe risalenti alla prima metà del '900. La differente prestazione va spiegata in relazione al loro differente rapporto di forma S/V, indice di compattezza: mentre C2 è una villa bifamigliare, C1 è un appartamento in edificio plurifamiliare, dunque, a parità di volume da riscaldare (V), C2 avrà superficie disperdente (S) molto maggiore di C1, risultando in carichi maggiori sull'impianto di climatizzazione.

- C2017 – climatizzazione estiva

Per quanto riguarda il tema della climatizzazione estiva in C2017, sono state effettuate analisi di comparazione tra gli edifici studiati, in modo da confrontare i loro consumi e l'utilizzo delle apparecchiature di climatizzazione presenti.

Per fare ciò sono stati costruiti degli alberi decisionali CART e dei modelli di regressione lineare multipla, in modo da fornire sia uno strumento di caratterizzazione che uno strumento di stima dei consumi legati alla climatizzazione estiva degli edifici analizzati.

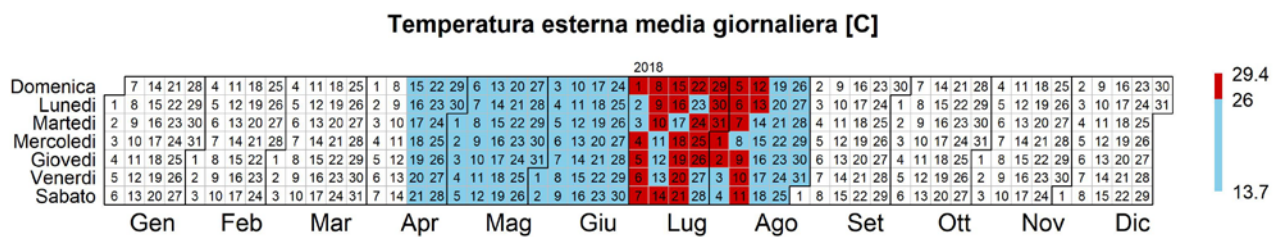


Figura 53 Calendar plot delle giornate con temperatura media esterna maggiore del set-point estivo.

Per effettuare queste analisi i dati sono stati ridotti al periodo di possibile funzionamento in base all'andamento delle temperature medie esterne giornaliere. In Figura 53 e Figura 54 sono state evidenziate le giornate in cui la temperatura media esterna ha superato i 26 °C, considerabile come set-point per la stagione di raffrescamento.

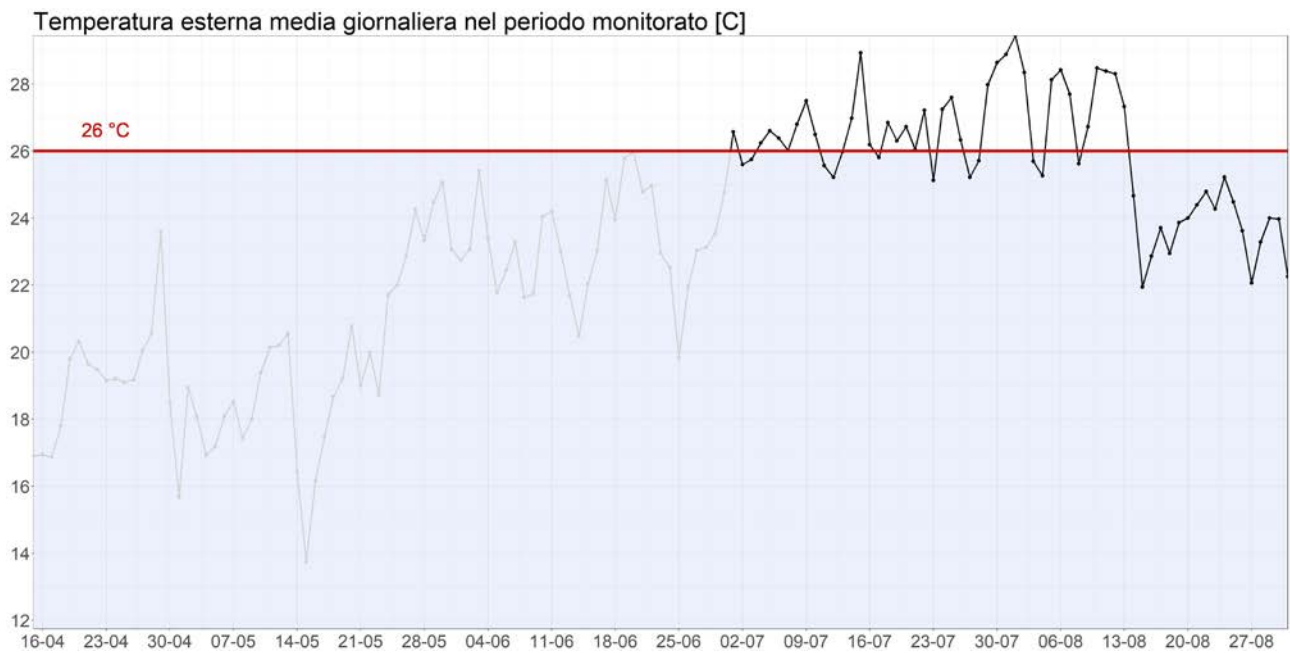


Figura 54 Profilo della temperatura esterna media giornaliera

Considerando l'andamento della temperatura esterna media giornaliera, è stato identificato come periodo di interesse per analizzare il possibile utilizzo dei condizionatori, il periodo dal 1 Luglio al 31 Agosto. In questo modo non vengono considerati giornate in cui il condizionatore non è stato utilizzato poiché le temperature non lo rendevano necessario. L'utilizzo dei condizionatori ha una grande variabilità tra gli edifici, come si può notare dalla Figura 55.

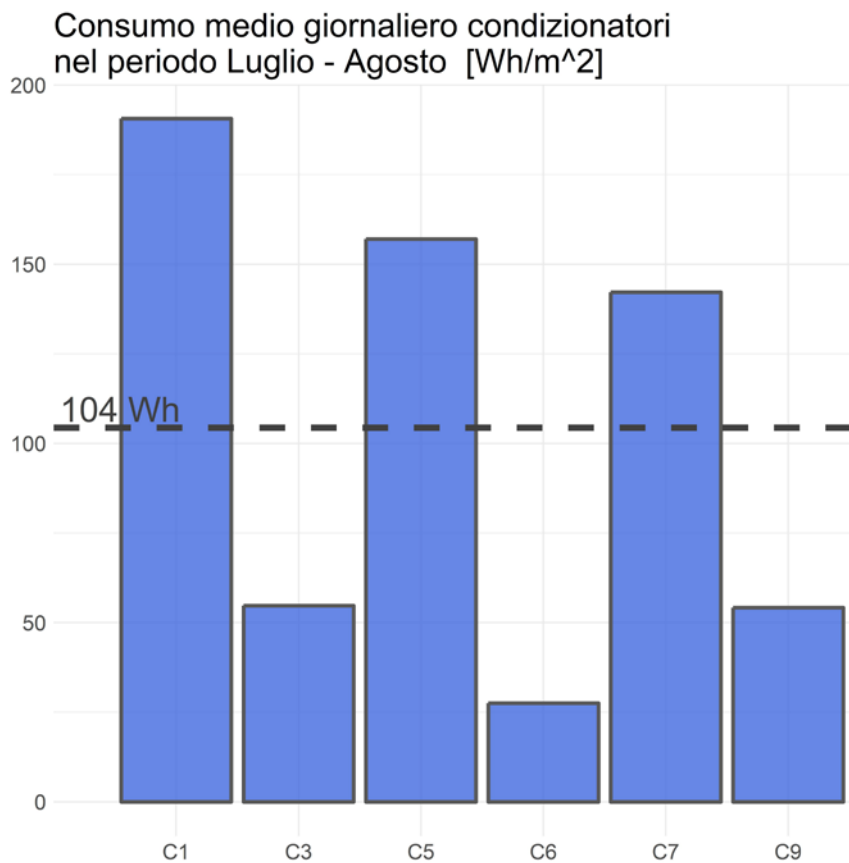
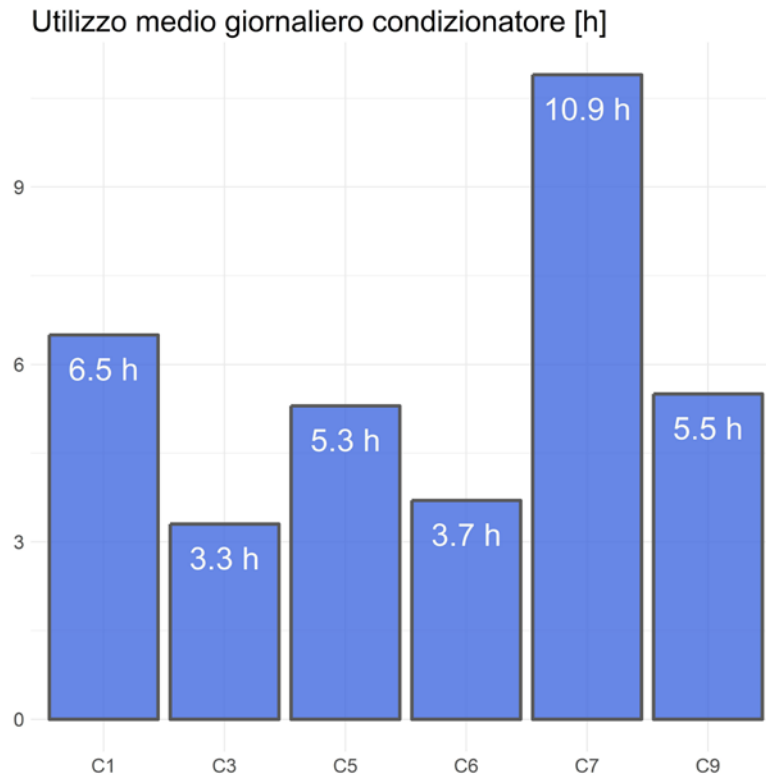


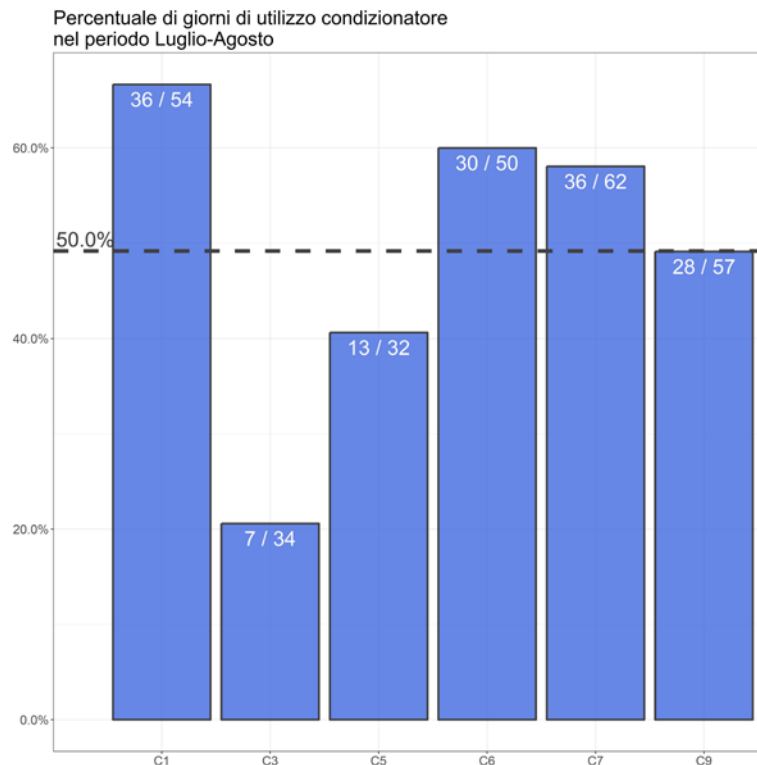
Figura 55 Consumo medio giornaliero nel periodo di luglio e agosto

Il confronto tra consumo medio giornaliero e numero di ore di funzionamento medie giornaliere, fornisce una indicazione dell'utilizzo dei condizionatori. Dalla Figura 55, si può notare come i consumi medi giornalieri sono più alti per gli edifici C1, C5 e C7, ma dalla Figura 56 si nota che le ore di funzionamento medie possono essere anche molto diverse. Nel caso del C7 alte ore di funzionamento corrispondono a consumi più alti. Nel caso di C1 e C5 i consumi sono alti, ma le ore di funzionamento sono più basse di C7, questo potrebbe essere sintomo di un funzionamento poco efficiente dei condizionatori presenti in questi ultimi edifici.



**Figura 56** Utilizzo medio giornaliero

Le ore di accensione mostrate in Figura 56 sono calcolate su base giornaliera e nel caso di monitoraggio di più condizionatori per la stessa abitazione, le ore sono state ottenute sommando le ore di accensione dei diversi condizionatori presenti. Per questa ragione l'utilizzo dovrebbe essere definito come "Ore-Condizionatore", ma per semplicità si utilizza soltanto l'indicazione "Ore".



**Figura 57** Percentuale di giorni di utilizzo dei condizionatori nel periodo luglio-agosto.

Inoltre, è stata presa in considerazione la percentuale di giorni in cui i condizionatori vengono utilizzati all'interno del periodo nel quale le temperature superano i 26°C. Le percentuali e la corrispondente frazione di giorni è rappresentata in Figura 57. Al denominatore il numero di giorni è diverso per i vari edifici, questo perché anche se i dati sono stati presi per lo stesso periodo, i giorni a disposizione dal monitoraggio sono diversi, come si può notare dalla Tabella 21.

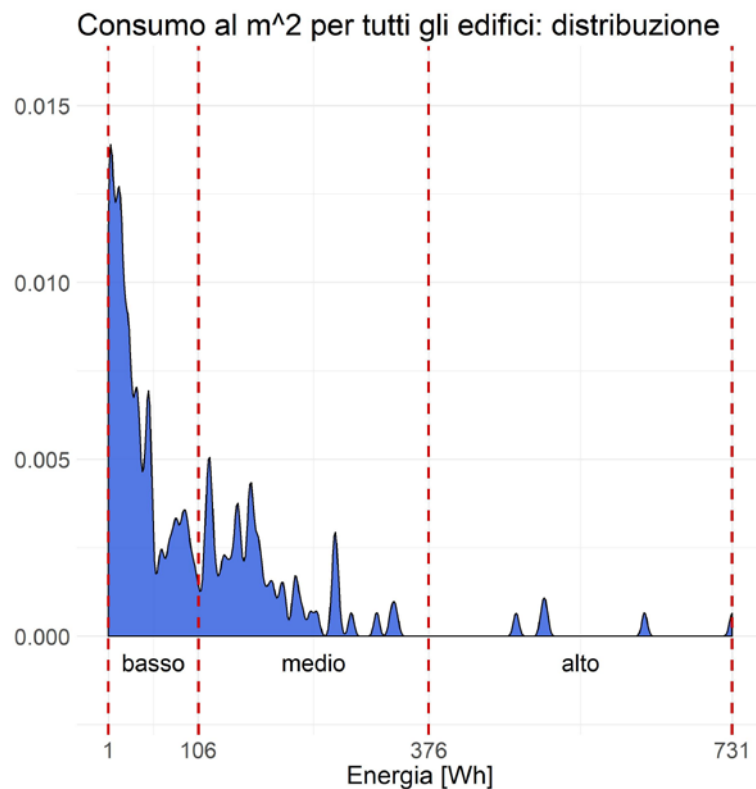
Osservando la Figura 57 si può notare come le percentuali siano molto vicine alla loro media, che si attesta al 50% dei giorni monitorati. Valori più bassi sono stati registrati solamente per gli edifici C3 e C5 i quali hanno anche il minor numero di giorni monitorati nel periodo di interesse, poiché il periodo di monitoraggio per questi edifici corrisponde circa al mese di Luglio. Questi dati permettono di capire quanto frequentemente sono stati utilizzati i condizionatori presenti, dando supporto alle analisi effettuate. Infatti, data la relativamente bassa percentuale di utilizzo negli edifici C3 e C5, i risultati delle analisi ci si aspetta che siano meno robusti rispetto a quelli degli altri edifici, poiché basati su un numero più basso di osservazioni.

Alla luce delle valutazioni di natura descrittiva, sono state condotte analisi di benchmark degli edifici a disposizione per effettuare un confronto, in particolare tramite l'utilizzo del CART per classificare i dati giornalieri di consumo dei condizionatori al metro quadro. Le variabili di input, utilizzate per caratterizzare i consumi si riferiscono sia a parametri interni che esterni agli edifici. Infatti, i consumi sono stati raggruppati in base all'epoca di costruzione dell'edificio, la quantità di ore di ombreggiamento dell'edificio, le ore di funzionamento giornaliero dei condizionatori e la temperatura media esterna.

Le variabili utilizzate come input sono sia numeriche che categoriche, a seconda del tipo di grandezza che si sta utilizzando, però solamente alcune variabili sono state scelte dall'algoritmo come significative per il raggruppamento dei dati analizzati.

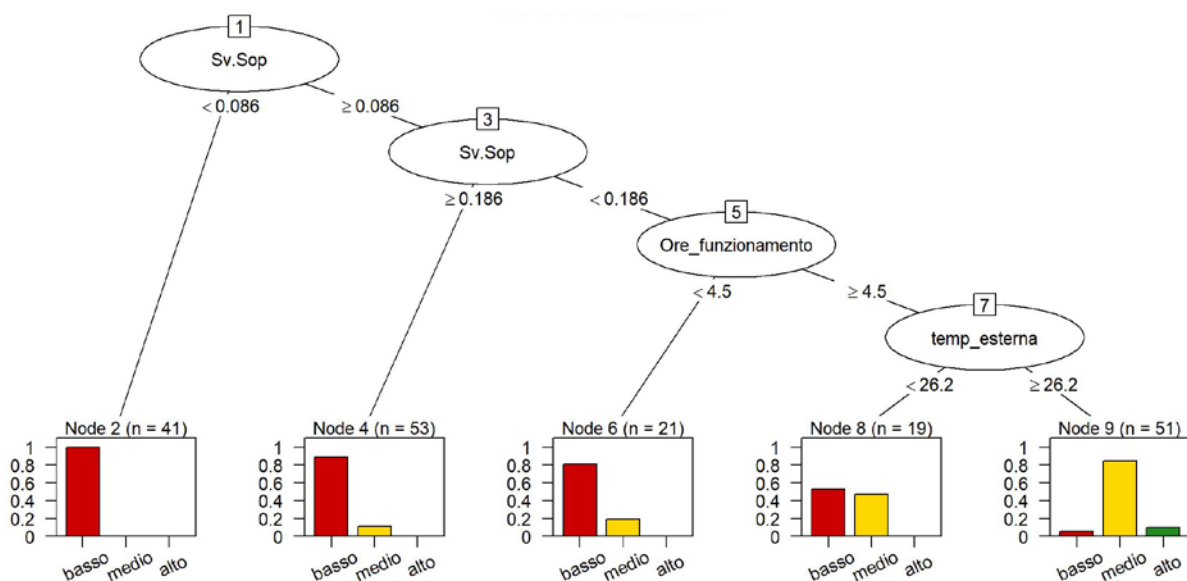
Il CART costruito è stato utilizzato come classificatore, quindi è stato necessario discretizzare in 3 classi di consumo giornaliero al metro quadro, definite come "basso", "medio" e "alto", che sono stati rappresentati nella Figura 58. Per questo tipo di analisi i dati utilizzati si riferiscono solamente ai giorni in cui c'è stato un utilizzo dei condizionatori presenti, dunque non è presente il livello "spento".





**Figura 58** Distribuzione e discretizzazione dei consumi al m<sup>2</sup> dei condizionatori

Nella Figura 59 si possono notare gli split effettuati per effettuare la caratterizzazione dei consumi per tutti gli edifici analizzati. L'errore di classificazione commesso è molto basso, pari al 15%, questo dovuto a una grande profondità di sviluppo dell'albero decisionale, che riesce quindi a creare gruppi molto omogenei ai nodi foglia. Già dalla distribuzione rappresentata in Figura 58 si nota come ci sia un grande sbilanciamento nella distribuzione dei valori di consumo, che denota una presenza maggiori di valori bassi o nulli.



**Figura 59** CART per benchmark di tutti gli edifici studiati

Dalla Figura 59 si evince come un parametro molto importante per la definizione dei consumi è il rapporto superficie vetrata su quella opaca. Infatti, i consumi più bassi si riscontrano per valori più bassi di questo parametro, poiché è legato alla quantità di apporti solari presenti.

Inoltre, viene evidenziato anche come le ore di funzionamento e la temperatura esterna sui consumi siano direttamente correlate con i consumi. In questo modo sono stati considerati sia parametri interni, legati alle caratteristiche dell'involucro e all'utilizzo degli impianti, che esterni all'edificio. I risultati ottenuti possono essere utilizzati per caratterizzare i dati di consumo degli edifici e quindi indagare sui fattori che influenzano maggiormente il consumo legato all'utilizzo dei condizionatori.

Non è stato possibile costruire una regola che permettesse di generare un raggruppamento al nodo foglia di dati con prevalenza "alto". Questo è dovuto dalla bassa numerosità dell'occorrenza di questo livello di consumo.

Un'analisi simile è stata effettuata solamente per gli edifici di cui si hanno a disposizione anche dei dati validi di temperatura interna, cioè C1, C3 e C7. In questo modo, è stato possibile includere anche ulteriori variabili come input per la costruzione del CART utilizzato anch'esso come classificatore, come si può vedere nella Figura 60. La discretizzazione dei consumi corrisponde a quella utilizzata per il CART precedente, in modo tale da avere un riferimento comune.

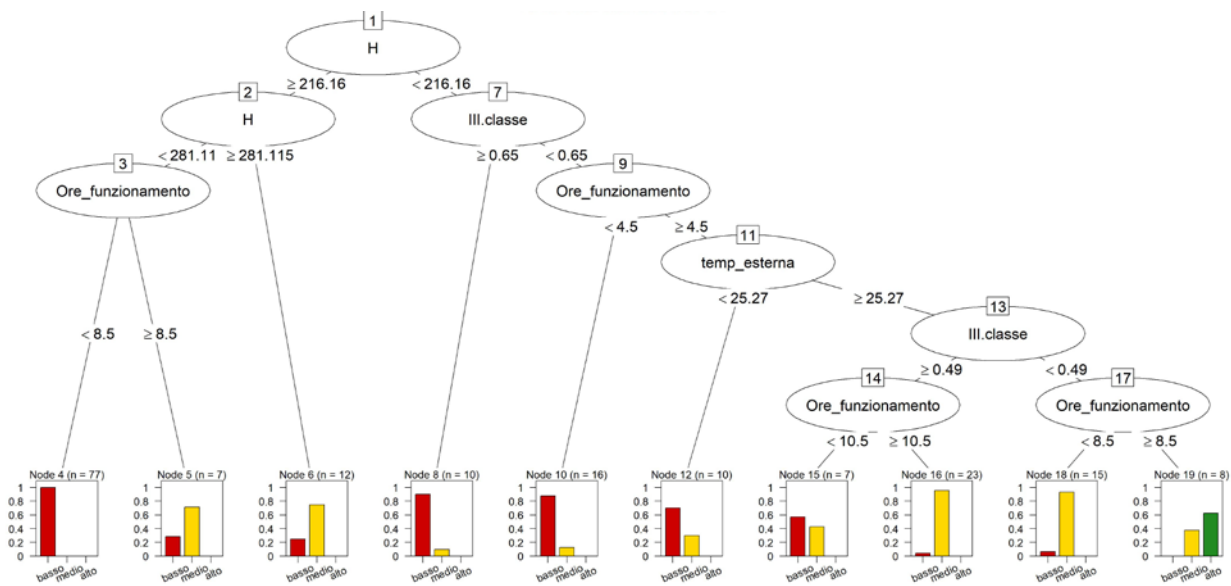


Figura 60 CART per benchmark dei soli edifici con dati di temperatura interna (C1, C3 e C7)

Le variabili utilizzate come input sono anche per questo caso interne ed esterne all'edificio. In particolare, la categorizzazione dei dati di consumo al metro quadro giornaliero, è stata effettuata in base al coefficiente medio globale di scambio termico H, le ore di funzionamento dei condizionatori presenti, la temperatura esterna e la percentuale di ore in cui l'edificio si trova in classe di comfort III secondo la norma UNI EN 15251. Il valore di H è stato calcolato, per ciascuna delle abitazioni, come somma dei flussi termici attraverso tutti gli elementi dell'involucro (opachi e trasparenti), note le loro trasmittanze, la loro esposizione e la loro estensione. Benché il dato sia più rilevante in periodo invernale che in stagione estiva, esso è stato individuato come metrica adatta a descrivere la qualità media dell'involucro. A migliorare la descrizione dell'involucro con una maggiore attenzione per le dinamiche estive è la variabile "superficie vetrata su superficie opaca", calcolata come rapporto tra le superfici trasparenti, responsabili dei carichi dovuti agli apporti solari, e quelle opache verticali, abitazione per abitazione.

Per descrivere la qualità termica interna è stata scelta quale variabile di input al modello la percentuale di giornate per le quali il dato di temperatura interna media giornaliera soddisfa il requisito di temperatura massima associato alla classe III, che da sola individua lo spartiacque tra il discomfort e i diversi livelli di qualità termica (classi I, II e III). Ai fini dell'analisi condotta, questo valore è stato considerato fisso, come una caratteristica intrinseca dell'edificio.

Lo schema ottenuto con le caratteristiche degli edifici che appartengono ai nodi foglia, oltre che all'utilizzo medio che viene fatto dei condizionatori presenti, viene analizzato in modo da dare una giustificazione ai risultati ottenuti.

Un raggruppamento fatto in base alle regole trovate dal CART costruito in questo modo, riescono a generare un nodo foglia con solamente dati appartenenti a C3, cioè il nodo foglia 4. Il consumo relativamente basso individuato per C3 può essere legato allo scarso utilizzo che viene fatto del condizionatore in questo edificio. Poiché escludendo le ore notturne dalla media della temperatura interna giornaliera il dato per C3 è più influenzato di quanto non avvenga in C1 e C7, questo significa che C3 raggiunge soddisfacimento di comfort nelle ore notturne, non utilizzando il condizionatore. Anche il suo elevato ombreggiamento e la qualità dell'involucro migliore rispetto a C1 gli garantiscono probabilmente di evitare più frequentemente il discomfort senza accendere l'impianto. In generale l'occupante di C3 sente meno la necessità di utilizzare il condizionatore per raffrescare gli ambienti o, ad analizzare meglio come le giornate di comfort si distribuiscono tra le tre classi (e non solo quando spesso il dato medio giornaliero è migliore rispetto alla IV) grazie alle analisi riportate in precedenza, egli vi rinuncia più facilmente: C3 è infatti l'unica abitazione delle tre analizzate in Figura 60 che non raggiunga mai condizioni ottimali (classe I). Per quanto riguarda gli edifici C1 e C7 che si trovano per meno tempo in classe di comfort III rispetto a C3 poiché rientrano perlopiù nei nodi foglia 10, 12, 15, 16, 18, 19, dunque l'utilizzo del condizionatore è preferito per via dalle temperature interne mediamente più alte. Nonostante le ore di utilizzo del condizionatore per C1 sono inferiori rispetto a C7, i consumi di C1 si trovano anche in fascia alta, confrontabili dunque con C7, la quale ha infatti un involucro con migliori prestazioni, essendo recente, e una distribuzione delle giornate nelle diverse fasce di comfort più bilanciata. Cioè dovuto probabilmente un utilizzo dell'impianto più continuativo e meno impulsivo, come avviene invece probabilmente in C1, dove gli occupanti raggiungono comfort ottimale con una certa frequenza (Figura 47), ma non lo mantengono.

Oltre alla caratterizzazione dei consumi è stata condotta una analisi di benchmark interno costruendo anche uno strumento di previsione, che permette di confrontare dati futuri con valori generati da un modello del sistema del singolo edificio che fornisce quindi un riferimento del funzionamento tipico di ogni edificio.

Per questo scopo, sono stati costruiti modelli di regressione lineare multipla sulla base dei dati giornalieri per le sole giornate in cui c'è stato un utilizzo dei condizionatori presenti.

I modelli costruiti sono in grado di fornire valori di consumo riferito alla superficie delle stanze raffrescate, utilizzando come input le ore di funzionamento e la temperatura media esterna.

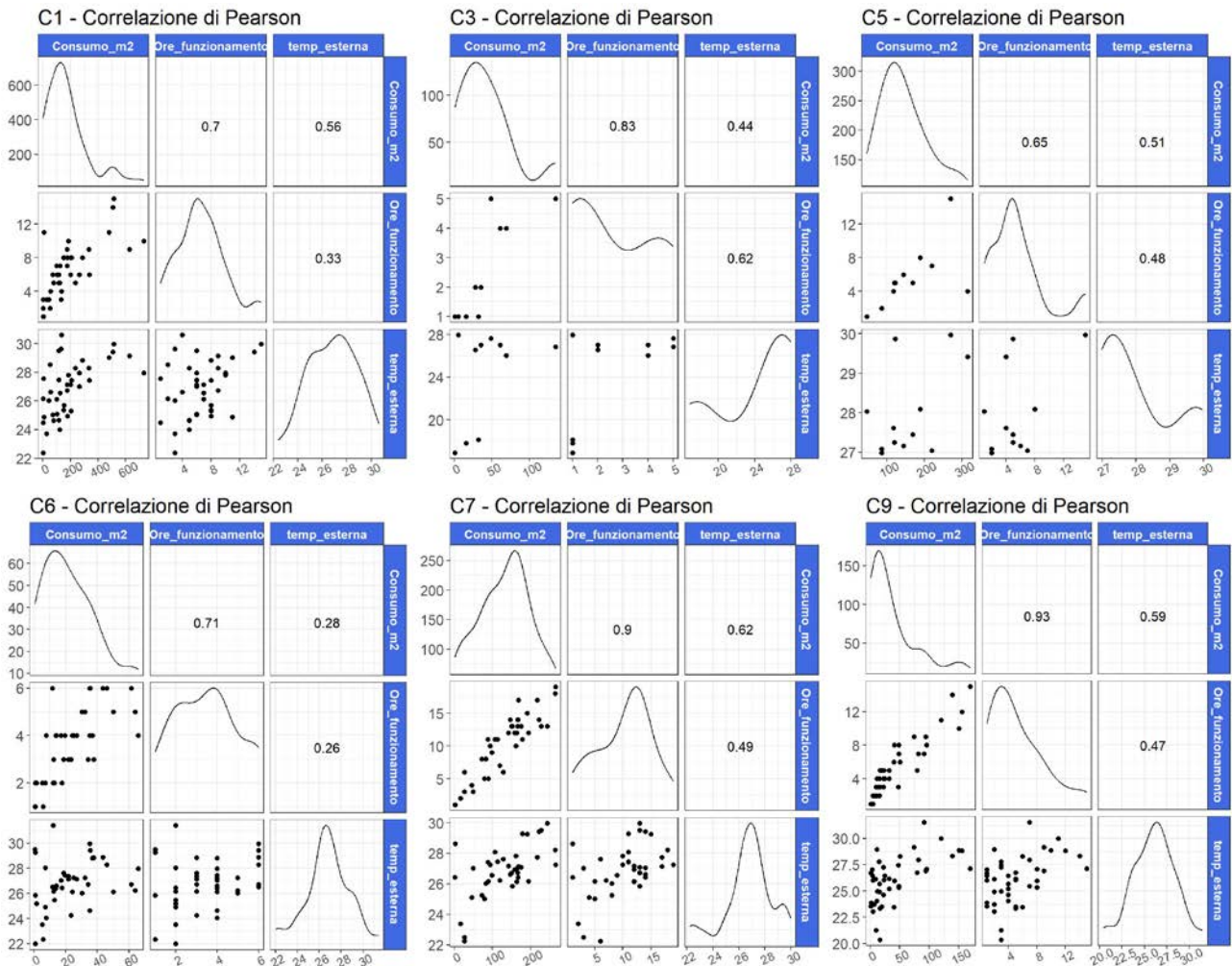


Figura 61 Distribuzioni e correlazione di Pearson delle variabili usate per nei modelli

Le variabili sono state scelte in modo tale da avere una formulazione analoga per ogni edificio, quindi composta dalle stesse variabili. Inoltre, la scelta è stata fatta guardando l'indice di correlazione di Pearson tra le variabili di input e quella di output così come quello tra le variabili di input.

Nella Figura 61 viene mostrato l'indice di correlazione di Pearson tra le variabili considerate per ognuno degli edifici analizzati. Inoltre, viene rappresentata anche la distribuzione dei punti di ogni variabile e il grafico a dispersione di punti di ogni combinazione tra le variabili scelte.

L'indice di correlazione di Pearson tra due variabili è definito come il rapporto tra la covarianza delle due variabili considerate e il prodotto tra le loro deviazione standard. [13]

I valori di correlazione ottenuti sono tutti positivi, ciò significa che le variazioni tra le variabili sono concordi, con una correlazione solitamente maggiore tra consumi e ore di funzionamento rispetto a quella tra consumi e temperatura esterna.

La costruzione del modello ha portato alla stima dei coefficienti per esprimere le relazioni tra le variabili in una formulazione di tipo polinomiale di primo grado. Inoltre, i modelli sono stati ottimizzati in modo tale da migliorare l'accuratezza e la significatività dei valori predetti. Per fare ciò sono stati scartati alcuni dei punti che influenzavano negativamente i risultati.

Infatti, è stata calcolata la distanza di Cook dei punti ottenuti per definire l'importanza dei punti sulla costruzione del modello. La distanza di Cook è definita come la somma dei cambiamenti nel modello di regressione quando l'osservazione in esame viene rimossa dall'analisi, definendo il grado di influenza dell'osservazione sul modello risultante.

Per la costruzione dei modelli sono stati scartati tutti i punti che presentavano una distanza di Cook maggiore di 1, poiché influenzano molto il modello.

Queste operazioni hanno portato alla riduzione del data-set usato per la costruzione dei modelli, in favore di una migliore accuratezza e significatività.

I modelli ottenuti sono mostrati in Figura 62 in termini di relazione tra consumo al metro quadro predetto e quello realmente misurato durante il monitoraggio del sistema. Questa rappresentazione permette di visualizzare l'accuratezza dei modelli costruiti, poiché i punti rappresentati dovrebbero attestarsi lungo la bisettrice, poiché nel caso ideale i valori predetti corrispondono a quelli reali

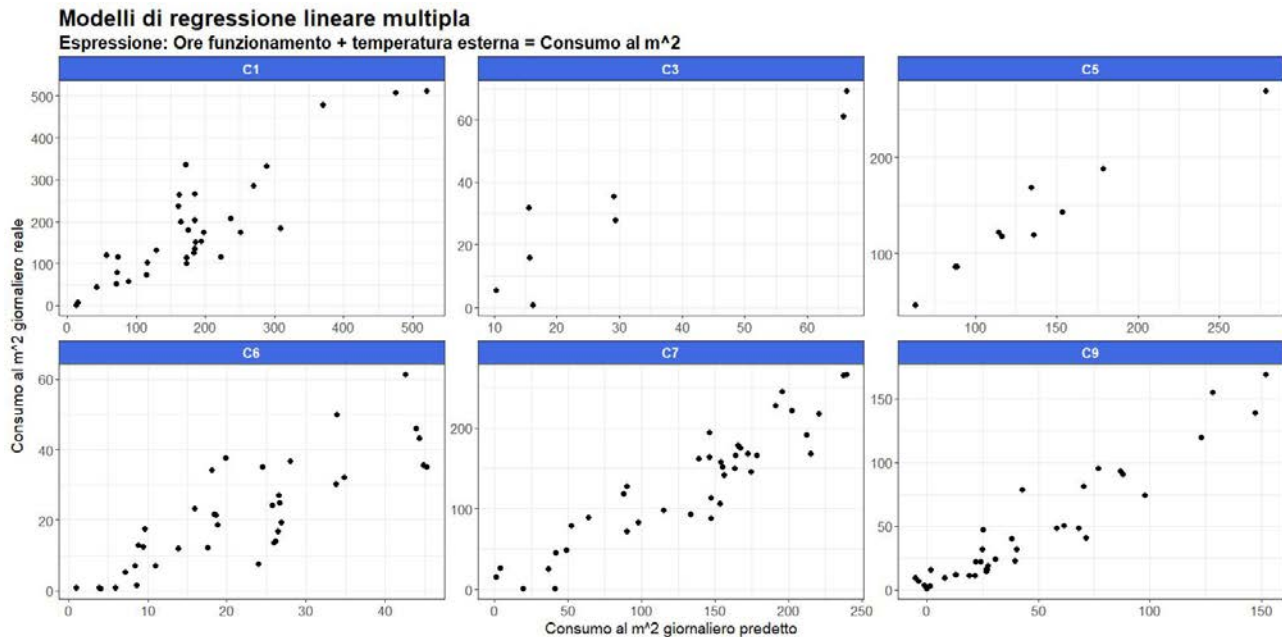


Figura 62 Modelli di regressione lineare multipla

La validità dei modelli costruiti quindi viene valutata in base a parametri diversi che determinano sia il grado di accuratezza della previsione, sia la significatività della correlazione trovata. Questi parametri sono stati valutati in rispettivamente in termini di  $R^2$  e Valore p, riassunti nella Tabella 25.

Tabella 25 Accuratezza modelli

	$R^2$	Valore p
<b>C1</b>	0.77	1.1e-10
<b>C3</b>	0.86	7.8e-03
<b>C5</b>	0.94	4.8e-05
<b>C6</b>	0.69	2.3e-09
<b>C7</b>	0.85	1.2e-15
<b>C9</b>	0.9	7.2e-18

Il valore di R quadro misura quanto correttamente il modello spiega i dati usati, poiché è definito come il rapporto tra la devianza spiegata dal modello e la devianza totale.

Questo parametro è calcolato come  $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{pred,i} - y_{i,media})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i,media})^2}$ , dove  $y_{pred,i}$  sono i punti predetti dal modello,  $y_i$  sono i punti osservati,  $y_{i,media}$  è la media [14].

Livelli di accuratezza elevati sono raggiunti nel caso in cui  $R^2$  assume valori vicini a 1, mentre livelli di significatività dei risultati alti sono raggiunti con Valori p inferiori a 0,05.

Il Valore p determina la probabilità di osservare un valore maggiore o uguale del valore t, il quale rappresenta la misura di quante deviazioni standard si discostano i coefficienti stimati da 0 [14].

In questo caso la significatività risulta elevata, mentre l'accuratezza è relativamente meno elevata soltanto per i casi degli edifici C1 e C6.



È stato preso in considerazione anche il livello di significatività delle singole variabili, che risulta relativamente alto per i modelli costruiti per C1, C7 e C9, mentre risulta più basso per C3, C5 e C6, probabilmente a causa del più basso numero di punti utilizzati e della correlazione più bassa della temperatura esterna con i consumi.

La correttezza della previsione dei modelli può essere valutata anche guardando la distribuzione dei residui, ottenuti dalla differenza tra i valori reali e i valori predetti. I residui di un buon modello dovrebbero essere distribuiti in modo simmetrico e normale, in modo da avere un modello che riesca ad avere una risposta molto vicina a quella del sistema a cui si riferisce.

Le distribuzioni ottenute non sono sempre simmetriche, in particolare per i modelli costruiti per gli edifici C1 e C7. Per l'edificio C3 e C5, data la scarsità di punti a disposizione, la forma della distribuzione si discosta molto dalla forma della funzione di densità rappresentata.

Alla luce di queste valutazioni, i modelli costruiti per gli edifici C7 e C9 si possono considerare validi e robusti per la descrizione del sistema a cui si riferiscono, mentre gli altri anche se riescono a descrivere bene il sistema necessitano di più punti per riuscire a descrivere in modo più corretto la relazione che intercorre tra le variabili considerate.

## 6 Implementazione di strategie di gestione energetica intelligente

### 6.1 *Obiettivi e metodologia della sperimentazione*

Lo sviluppo tecnologico avvenuto nel recente passato ha di fatto contribuito alla penetrazione di sistemi di gestione automatica ed intelligente negli edifici, il cui ruolo sta diventando sempre più centrale per l'ottimizzazione della richiesta energetica in esercizio.

A tale scopo nel presente studio è stato sviluppato per mezzo del codice di simulazione dinamica IDAICE [15], il funzionamento di diverse logiche di controllo ed automazione per uno degli appartamenti del gruppo E2016 (aggregatore 1), al fine di valutare l'opportunità di ottimizzare la richiesta energetica garantendo nel contempo una buona qualità dell'ambiente interno. Il modello è stato sviluppato anche allo scopo di essere utilizzato all'interno di un gateway residenziale. [16]

Per l'appartamento in esame erano disponibili dati di monitoraggio relativi al consumo di gas e di energia elettrica, alle caratteristiche degli impianti, al numero degli apparecchi elettrici installati al suo interno e le relative ore di utilizzo.

È stato pertanto sviluppato dapprima un modello energetico dell'appartamento in esame per simulare la prestazione energetica di riferimento. Questo modello è stato calibrato sul consumo energetico reale dell'appartamento esistente con un'accuratezza elevata. Il Mean Bias Error (MBE) sul fabbisogno energetico per il riscaldamento è risultato pari all'1,1%, mentre sul fabbisogno di energia elettrica pari al 6,4%. Un modello siffatto ha consentito di simulare diversi scenari di gestione e controllo in modo affidabile con una buona accuratezza dei valori di risparmio energetico scaturiti dalla loro implementazione.

Nello specifico, le logiche di controllo e automazione sono state concepite con l'obiettivo di generare un sistema omogeneo di interazioni tra i componenti controllati tale da garantire comfort termico e visivo e una buona prestazione energetica. Per facilitare la sperimentazione, la logica di controllo è stata sviluppata in due fasi: una prima (fase1) ha riguardato tutti i sistemi che influenzano i parametri di qualità dell'ambiente costruito come la ventilazione, la termoregolazione e l'illuminazione; una seconda fase (fase2) ha riguardato la gestione di alcuni elettrodomestici. Nello specifico sono stati analizzati la qualità dell'aria, il comfort termigrometrico e visivo attraverso il controllo dell'apertura/chiusura delle finestre, la termoregolazione dell'impianto di riscaldamento, il controllo delle schermature solari, l'accensione/spengimento delle luci e il controllo delle schermature solari. Definiti i sistemi da controllare e l'ordine di priorità attraverso il quale essi devono funzionare, la logica è stata progettata attraverso lo sviluppo schemi di controllo.

### 6.2 *Informazioni generali sul caso studio e costruzione del modello dinamico*

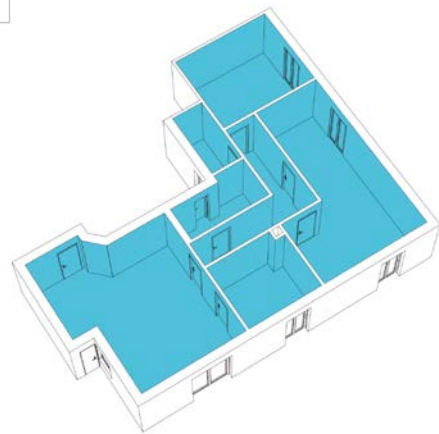
L'appartamento preso in esame fa parte del gruppo di analisi E2016, situato a Roma. Questo è stato costruito tra il 2005 e il 2009, è sito all'ultimo piano di una palazzina residenziale, ha la facciata principale esposta a

SUD /OVEST ed è abitato da un singolo utente pensionato.

L'appartamento è diviso principalmente in due zone: zona giorno e zona notte. La zona giorno è composta da soggiorno, cucina e sala da pranzo; mentre la zona notte è composta da due bagni, due camere e un corridoio. (Figura 63)

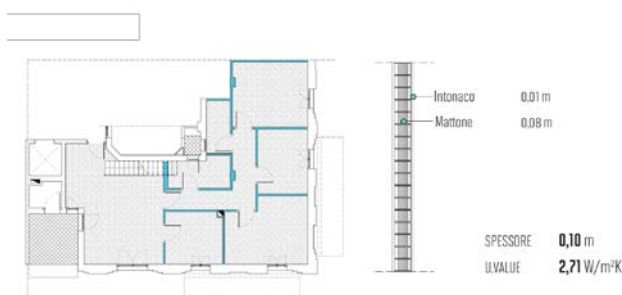


**Figura 63** Pianta 1:100



**Figura 64** Assonometria

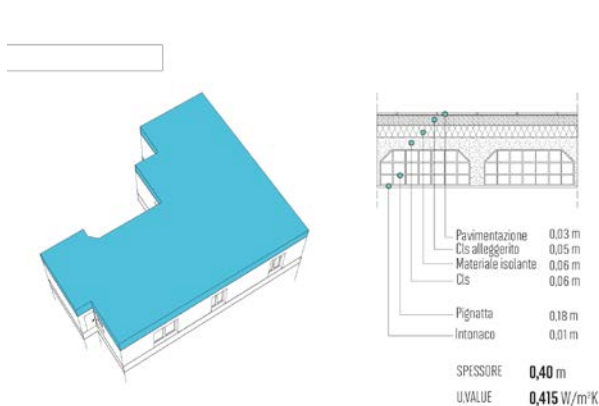
Le caratteristiche dell'involucro opaco, in assenza di informazioni specifiche a riguardo, sono state ricavate tramite i dati di uno studio condotto da ENEA nell'area Massimina di Roma [17]. Si è ipotizzato dunque che le pareti esterne fossero composte da una muratura ad intercapedine in laterizio, riempita con del materiale isolante in polistirolo, le pareti interne da una muratura in laterizio forato da 8 cm, il solaio interpiano da una struttura in latero cemento a pignatte, il solaio di copertura da una struttura in latero cemento a pignatte con un sottile strato di isolante verso l'esterno. (Figura 65, Figura 67)



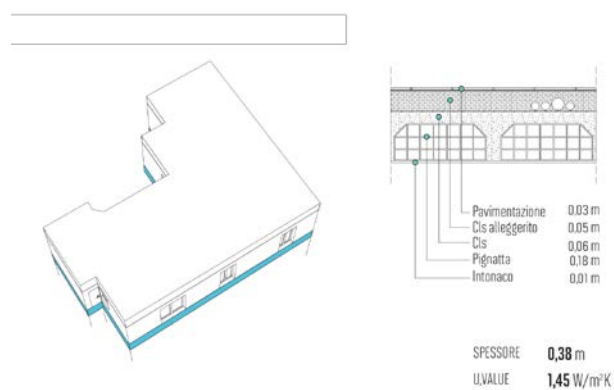
**Figura 65** Muratura interna



**Figura 66** Muratura esterna



**Figura 67** Solaio di copertura



**Figura 68** Solaio interno



Per quanto riguarda l'involucro trasparente tutte le finestre sono dotate di un doppio vetro (Figura 69). I sistemi di oscuramento sono delle tapparelle totalmente oscuranti.

In generale sono presenti 4 tipologie di finestre a seconda della loro dimensione:

- Finestra 01: 1,00 m\* 2,20 m;
- Finestra 02: 1,60 m\* 2,20 m;
- Finestra 03: 0,90 m\* 1,40 m;
- Finestra 04: 0,60 m\* 1,40 m.



Figura 69 Tipologie finestre

Lo stesso tipo di analisi è stato svolto anche per le porte e per i ponti termici. L'impianto di riscaldamento e di produzione di acqua calda sanitaria è caratterizzato da una caldaia autonoma a gas metano. I terminali di emissione per il riscaldamento sono dei radiatori. (Figura 70, Figura 71)

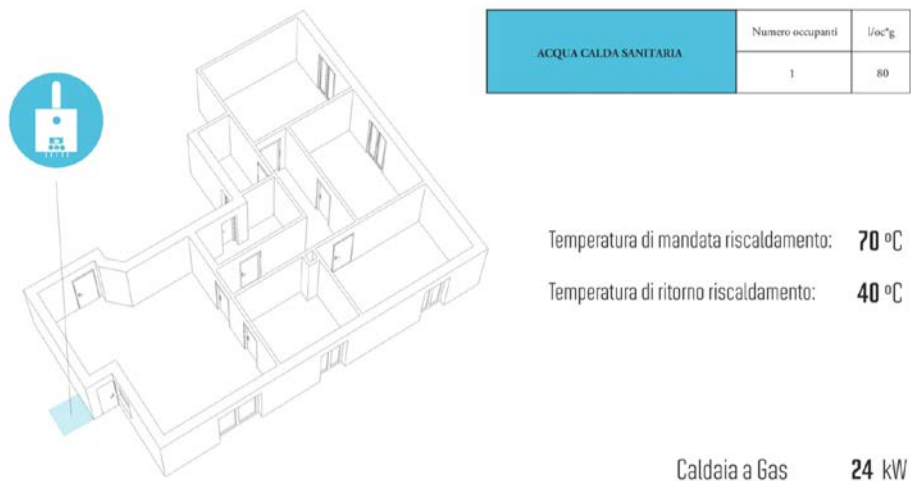
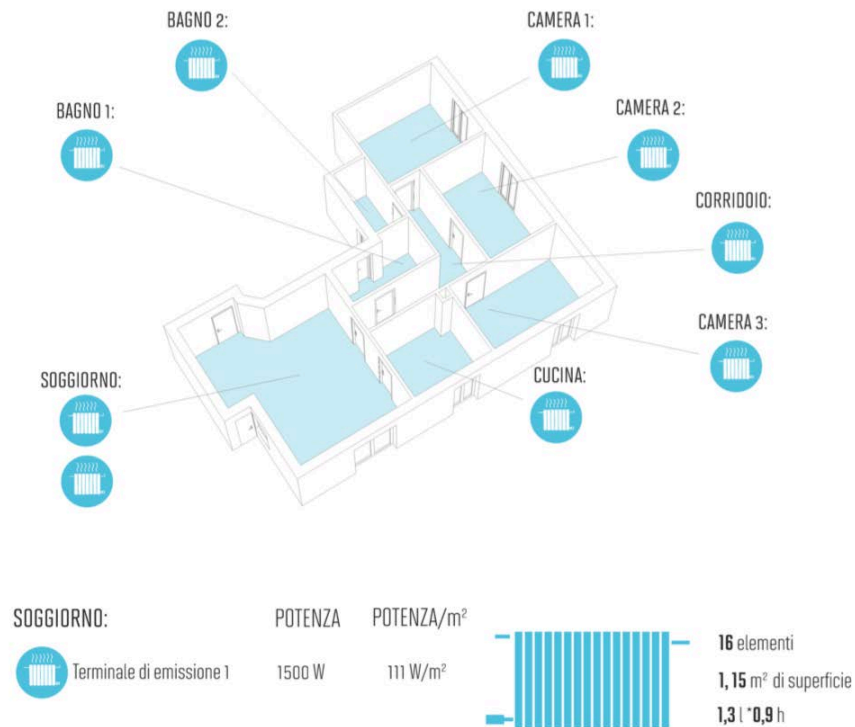


Figura 70 Impianto di riscaldamento e ACS



**Figura 71** Terminali di emissione

L'appartamento è anche dotato di un impianto di pannelli fotovoltaici. Questo è composto da 12 pannelli esposti 40° a S/W e inclinati il 15° rispetto al suolo. La potenza di picco indicata nei documenti è di 1,8 kW. (Figura 72)



**Figura 72** Impianto fotovoltaico

Per quanto riguarda invece gli elettrodomestici, è stata fornita una tabella con un elenco delle tipologie di apparecchi, delle ore o minuti di utilizzo giornaliero e della classe energetica. Non erano disponibili, invece, le potenze nominali che sono state ricavate confrontando diverse schede tecniche di prodotti presenti in commercio e grazie alla parte del Report Rds/PAR2015/020 redatta dall'Università Politecnica delle Marche, intitolata "Sviluppo di un simulatore rete di edifici residenziali e implementazione di un modello di smart

district". [17]

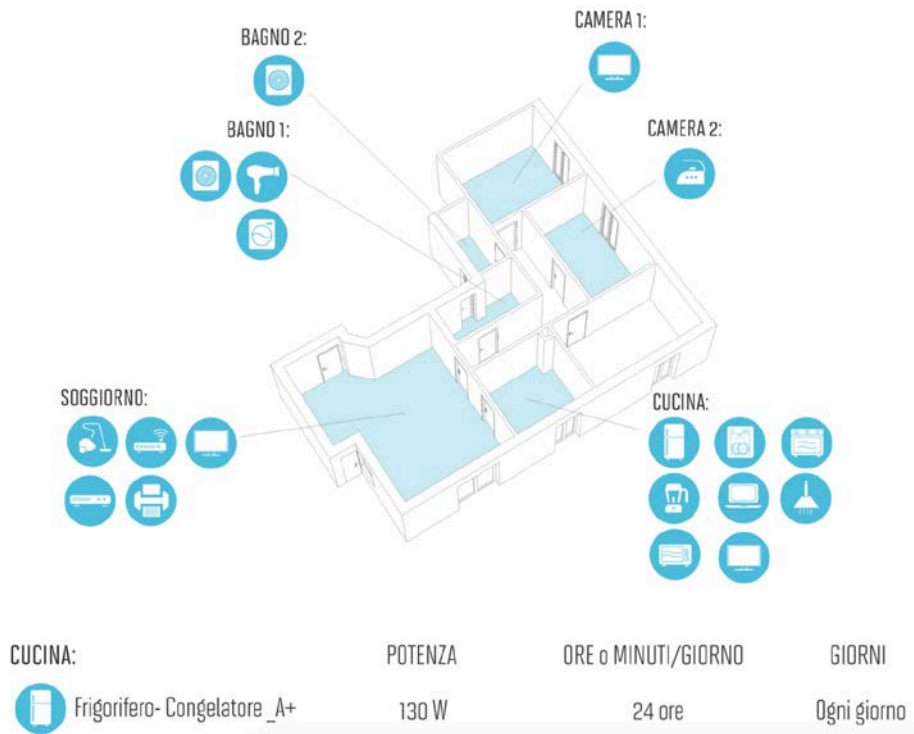


Figura 73 Elettrodomestici

Come per gli elettrodomestici, anche per le luci è stata fornita una tabella con la tipologia sorgenti installate con il tempo di utilizzo giornaliero, stanza per stanza.

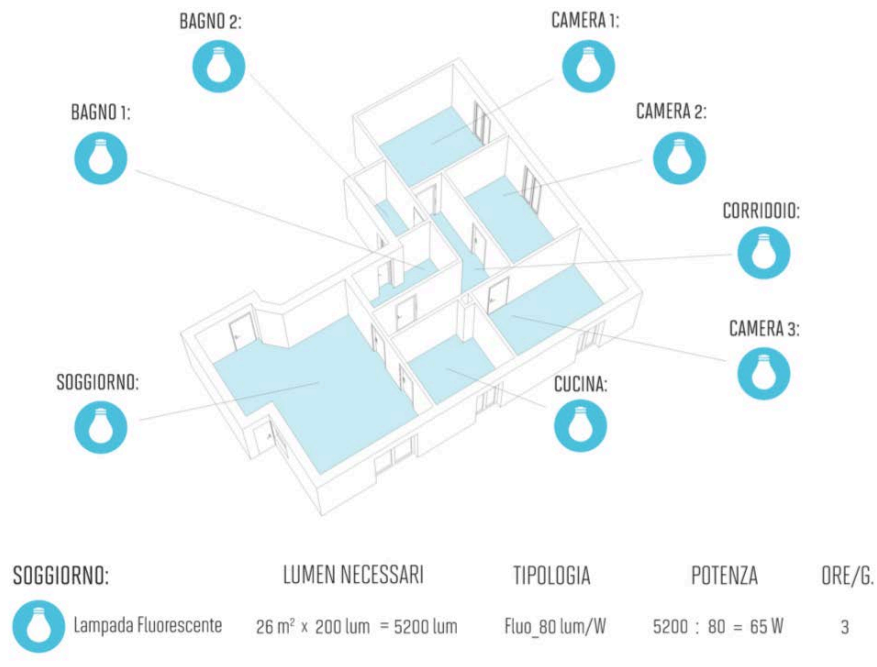
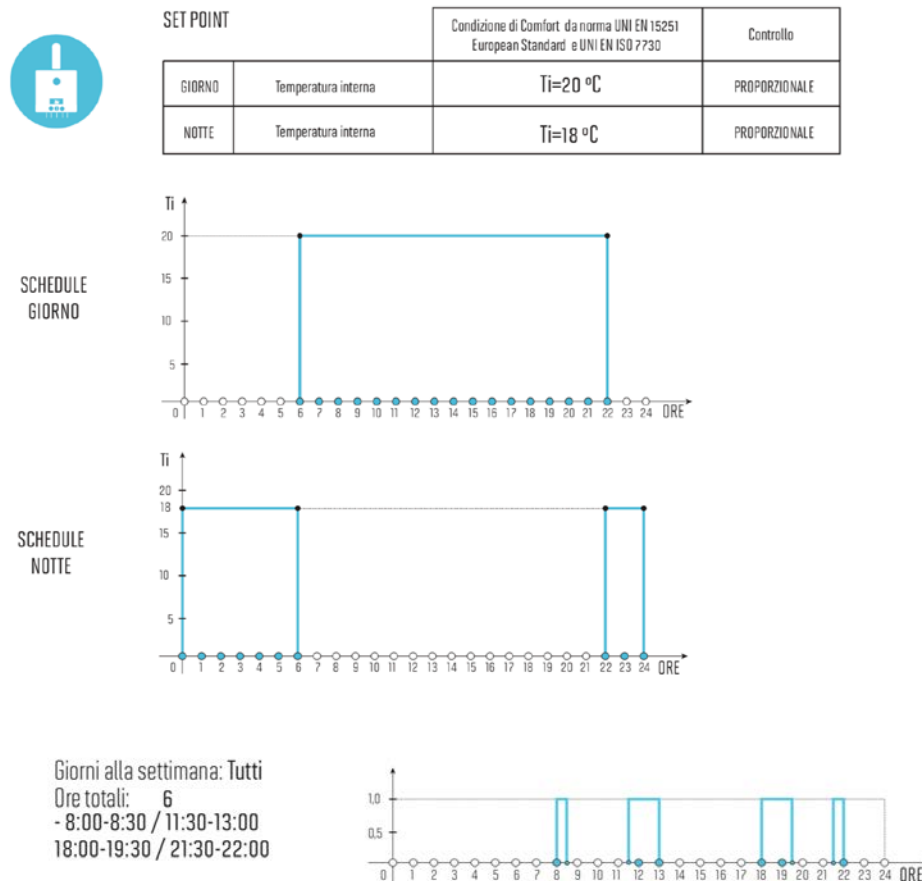


Figura 74 Sorgenti luminose

L'analisi dello stato di fatto è stata necessaria per la corretta costruzione del modello dinamico dell'appartamento sul software IDA-ICE. Una ricerca bibliografica a riguardo ha permesso di ipotizzare l'utilizzo nel tempo delle apparecchiature più probabile.

Il modello è stato calibrato analizzando il *Mean Bias Error* (MBE) tra il consumo simulato e quello reale ed è stato verificato che non fosse maggiore del 5%. Per effettuare il processo di calibrazione si è adottato il processo descritto nell'articolo di Fabrizio et al. [18]

Di seguito sono riportati alcuni esempi di schedule derivanti dai dati e ipotizzate sulla base di analisi bibliografica. Per quanto riguarda l'impostazione dei parametri di utilizzo dell'impianto di riscaldamento e ACS è stato ipotizzato il funzionamento del termostato in base alla normativa europea sul comfort abitativo UNI EN 15251 [19].



**Figura 75** Set-point e schedule riscaldamento e schedule ACS

Per quanto riguarda i dati orari di accensione delle luci e di utilizzo degli elettrodomestici è stata formulata un'ipotesi di schema d'uso specifico per il caso, basata sia sui dati orari in possesso che sui dati statistici provenienti da una ricerca condotta nell'ambito del progetto MICENE [20].

Qui di seguito sono riportati alcuni esempi di schedule riferiti all'uso degli elettrodomestici e dell'illuminazione artificiale. (Figura 76, Figura 77)



Giorni alla settimana:  
Lunedì, Mercoledì, Venerdì  
Ore/minuti totali: 2,5 ore  
- 8:30-9:30 / 15:00-17:00



Giorni alla settimana:  
Martedì, Giovedì, Sabato, Domenica  
Ore/minuti totali: 2,5 ore  
- 8:30-11:30 / 15:00-16:00

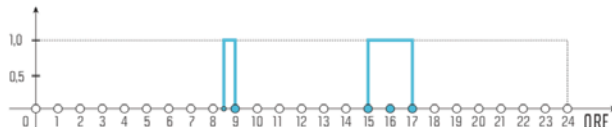


Figura 76 Esempio schedule elettrodomestici

SOGGIORNO:



Giorni alla settimana:  
Martedì, Giovedì, Sabato, Domenica  
Ore totali: 2,5 ore  
- 8:30-9:30/15:00-17:00



Giorni alla settimana:  
Martedì, Giovedì, Sabato  
Ore totali: 3 ore  
- 8:30-10:30/15:00-16:00



Figura 77 Esempio schedule luci

Sulla base delle schedule progettate per l'illuminazione e per gli elettrodomestici sono anche state ipotizzate le schedule per il profilo d'uso da parte dell'utente. Qui di seguito viene riportato un esempio. (Figura 78)

CUCINA:



Giorni alla settimana: tutti  
Ore totali: 6 ore  
- 6:00-8:00/12:00-13:00  
- 14:00-15:00/18:30-19:30  
- 20:30-21:30

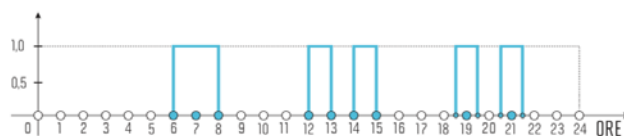


Figura 78 Esempio schedule occupante

Sono state ipotizzate anche delle schedule di apertura/chiusura delle finestre e dei sistemi oscuranti (Figura 79)

SCHEDULE TAPPARELLE



Giorni alla settimana: tutti  
Ore/minuti totali: 8 ore  
- 22:00-6:00



Figura 79 Esempio schedule sistemi schermanti

### 6.3 Calibrazione del modello energetico

Costruito il modello dinamico è stato effettuato il calcolo del fabbisogno energetico nel periodo dal 01/01/15 al 31/12/15. Questa scelta è stata fatta in modo tale da avere un confronto diretto con i dati di consumo reale dell'appartamento disponibili.

Per comprendere l'accuratezza dei dati ottenuti, come spiegato precedentemente, è stato calcolato il Mean Bias Error (MBE). Per i risultati riferiti al consumo elettrico il MBE è risultato pari al 6,19 %, valore accettabile considerata l'accuratezza dei parametri riportati nei documenti di partenza. Per i risultati riferiti al consumo per il riscaldamento il MBE è risultato circa pari al 2 %

Il modello ottenuto è stato dunque considerato sufficientemente accurato per testare il funzionamento delle nuove logiche di gestione e controllo che sono state sviluppate.

#### 6.4 Definizione delle logiche di controllo

L'obiettivo della seguente parte di sperimentazione è stato quello di progettare delle logiche di controllo e di automazione per una *Smart Energy Home* e di implementarle sul modello sviluppato al fine di stabilire il risparmio energetico ottenibile attraverso la gestione e automazione energetica [21]. Per comprendere al meglio come progettare questi sistemi, si è partiti dall'analisi del funzionamento di quelli realmente esistenti sul mercato. Generalmente un sistema BACS è in grado di controllare e automatizzare i sistemi di illuminazione, la termoregolazione, la ventilazione. Questi controlli possono basarsi su dei set-point impostati o su schemi prestabiliti di azioni in funzione di un modello standard. Solitamente nei sistemi BACS il controllo delle varie funzioni opera in maniera autonoma, pur utilizzando la stessa rete di trasmissione dati. Ad esempio, il sistema di termoregolazione è operato in modo indipendente da quello della ventilazione. Questa indipendenza dei sistemi di controllo può rappresentare un punto debole del sistema che, invece, dovrebbe essere capace di stabilire le interazioni tra le singole applicazioni e determinare un'azione di ottimizzazione globale. Nella presente sperimentazione si è deciso di modellare un sistema completamente automatizzato. La logica studiata durante questa sperimentazione è stata progettata in due fasi.

Nella prima fase sono state definite quattro singole funzioni di controllo: una per l'apertura/chiusura delle finestre, una per il controllo delle schermature solari, una per l'accensione/spegnimento delle luci e una per l'accensione/spegnimento dell'impianto. Queste quattro funzioni, pur essendo state implementate singolarmente, grazie allo studio effettuato in partenza, mantengono il loro carattere interattivo. Nella seconda fase (fase 2), invece, il lavoro si è concentrato sulla gestione dei carichi degli elettrodomestici seguendo i principi del Demand-Response.

#### 6.5 Fase 1: progettazione degli algoritmi di controllo

Nello sviluppo delle logiche si è voluto progettare un unico sistema di automazione omogeneo in modo tale da ottimizzare al massimo la gestione generale. Per fare ciò è stato necessario definire un ordine di priorità delle azioni in modo tale che i comandi della logica generale non entrassero mai in contraddizione. L'ordine di priorità scelto è il seguente:

ORDINE DI PRIORITA' DELLA LOGICA			
n.	Obiettivo	Azione	Salvaguardia
1°	QUALITA' DELL'ARIA INTERNA (IAQ)	VENTILAZIONE	SALUTE
2°	COMFORT TERMO-IGROMETRICO	TERMOREGOLAZIONE	COMFORT
3°	COMFORT VISIVO	ILLUMINAZIONE	COMFORT

Figura 80 Ordine di priorità della logica

La logica progettata, dunque, ha come obiettivo quello di mantenere le condizioni di comfort interno con la minima spesa energetica possibile e seguendo questo ordine di priorità.

Il primo passo per la definizione della logica è stato quello di identificare tutte le azioni possibili derivanti dai

sistemi controllati, e di capire su quali parametri queste azioni vadano principalmente ad agire (Figura 81).

AZIONI DEL SISTEMA	COMFORT
Regolazione sistema schermate	COMFORT TERMICO
	COMFORT LUMINOSO
Spegnimento e regolazione luci artificiali	COMFORT VISIVO
Apertura/chiusura finestre	QUALITA' DELL'ARIA
	COMFORT TERMICO
Accensione spegnimento e regolazione impianto di riscaldamento	COMFORT TERMICO

**Figura 81** Azioni del sistema VS Comfort

I parametri fisici che definiscono le condizioni di comfort, precedentemente elencate, sono:

*Qualità dell'aria:* misura del livello interno di ppm di CO2. Al fine del mantenimento della qualità dell'aria interna è necessario che il livello di CO2 non sia mai superiore al livello di CO2 limite stabilito,  $CO_2 > CO_2 \text{ lim}$  (CO2 set point).

*Comfort termico:* misura della temperatura interna  $T_i$ . Al fine del mantenimento del comfort termico interno è necessario che  $T_i$  non sia mai superiore o inferiore al livello di  $T_i$  limite stabilito,  $T_i < T_i \text{ lim}$ ,  $T_i > T_i \text{ lim}$  ( $T_i$  set point)

*Comfort visivo:* misura del livello di illuminamento interno. Al fine del mantenimento del comfort visivo interno è necessario che il livello di illuminamento non sia mai inferiore al livello di Lux lim stabilito,  $Lux < Lux \text{ lim}$  (Lux set point)

Nel caso in cui questi limiti vengono violati, le azioni di gestione dei vari sistemi, comandate dalle logiche di controllo, funzionano con l'obiettivo di ristabilire la situazione di comfort.

Di seguito sono riportati gli algoritmi sviluppati per regolare le azioni del sistema in accordo a quanto sviluppato nel PAR [21]:

1. algoritmi atti a mantenere i set point impostati per la temperatura interna, nella stagione estiva e invernale. (Figura 82, Figura 83, Figura 84, Figura 85)
2. algoritmi atti a mantenere il set point impostato per la qualità dell'aria, nella stagione estiva e invernale. (Figura 86)
3. algoritmi atti a mantenere il set point impostato per la qualità visiva, nella stagione estiva e invernale. (Figura 87)



1.1\_ESTATE- VARIABILE MISURATA: TEMPERATURA - IL SENSORE DI TEMPERATURA RISCONTRA UN VALORE DI TEMPERATURA SUPERIORE AL VALORE LIMITE IN STAGIONE ESTIVA

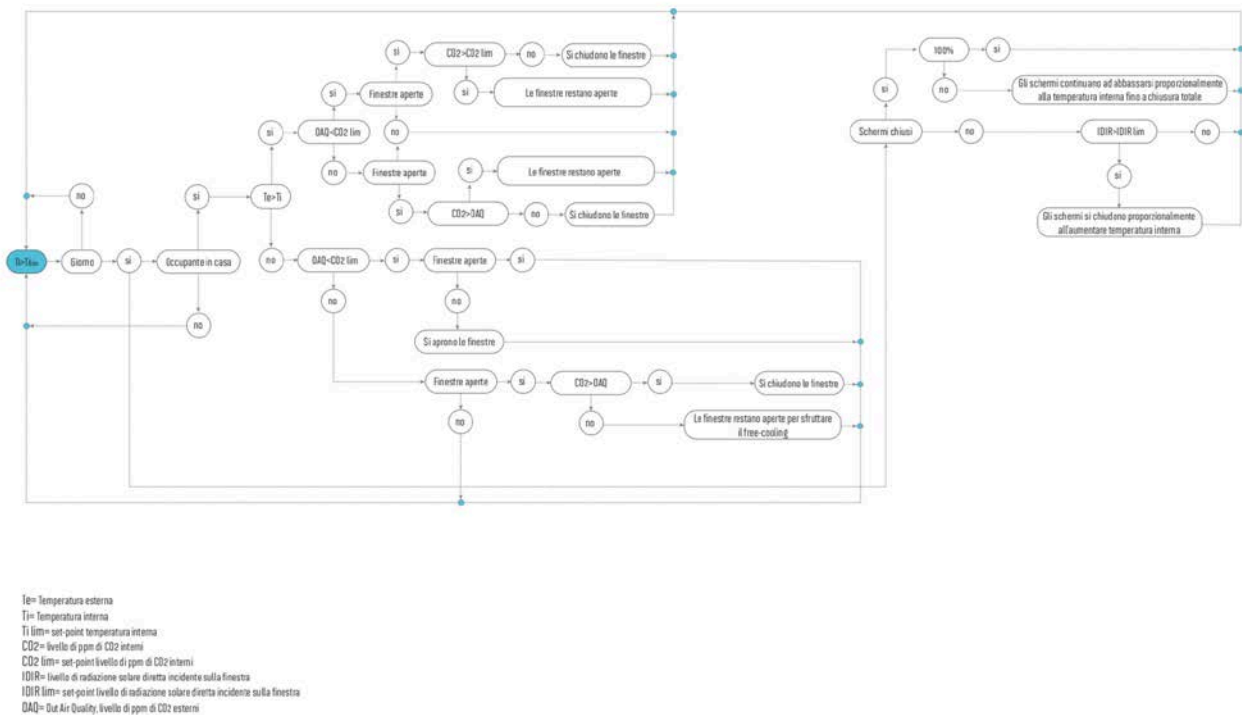


Figura 82 Algoritmo estate- variabile misurata: temperatura

1.3\_INVERNO- VARIABILE MISURATA: TEMPERATURA - IL SENSORE DI TEMPERATURA RISCONTRA UN VALORE DI TEMPERATURA MINORE AL VALORE LIMITE IN STAGIONE INVERNALE DI NOTTE

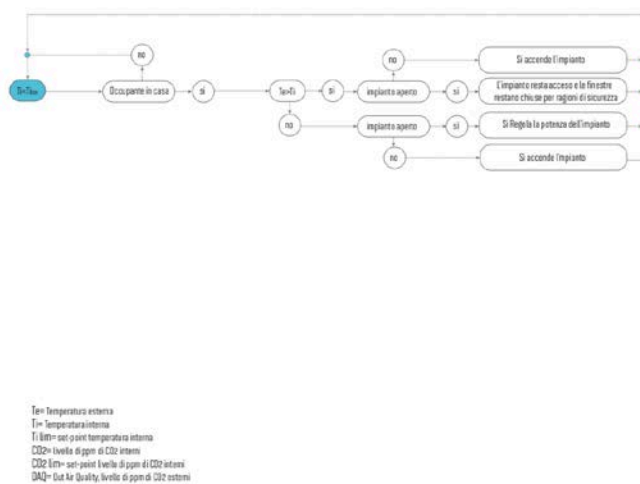
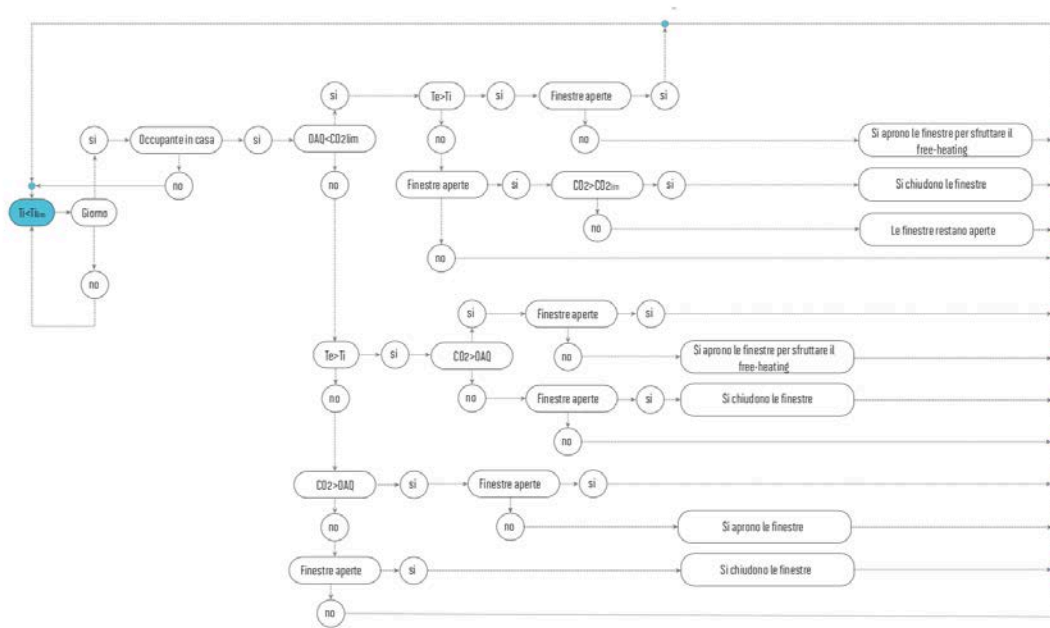


Figura 83 Algoritmo inverno- variabile misurata: temperatura

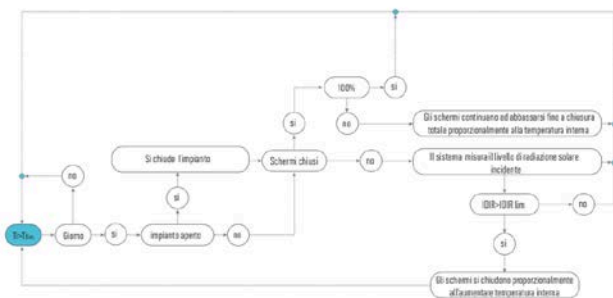
1.4\_ESTATE- VARIABILE MISURATA: TEMPERATURA - IL SENSORE DI TEMPERATURA RISCONTRA UN VALORE DI TEMPERATURA MINORE AL VALORE LIMITE IN STAGIONE ESTIVA



Te= Temperatura esterna  
 Ti= Temperatura interna  
 Ti lim= set-point temperatura interna  
 CO2= livello di ppm di CO2 interni  
 CO2 lim= set-point livello di ppm di CO2 interni  
 DAQ= Dut Air Quality, livello di ppm di CO2 esterni

Figura 84 Algoritmo estate- variabile misurata: temperatura

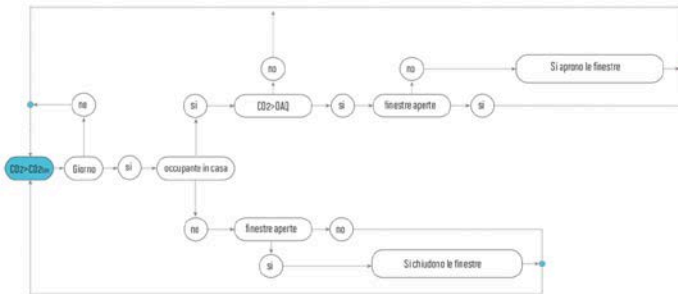
1.5\_INVERNO- VARIABILE MISURATA: TEMPERATURA - IL SENSORE DI TEMPERATURA RISCONTRA UN VALORE DI TEMPERATURA MAGGIORE AL VALORE LIMITE IN STAGIONE INVERNALE



T= Temperatura interna  
 Ti lim= set-point temperatura interna  
 IQD= livello di radiazione solare diretta incidente sulla finestra  
 IQD lim= set-point livello di radiazione solare diretta incidente sulla finestra

Figura 85 Algoritmo inverno - variabile misurata: temperatura

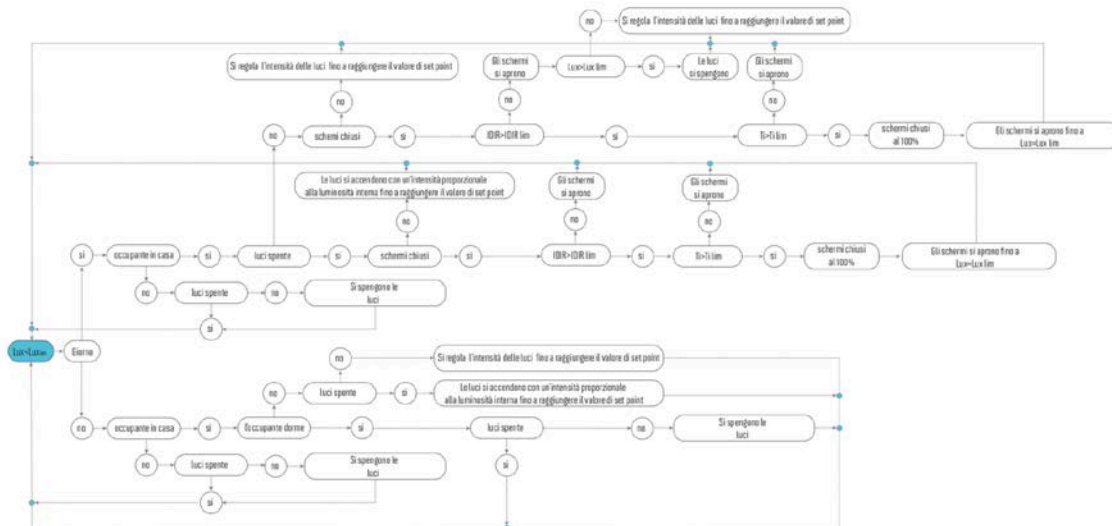
2.1\_ IL SENSORE DI CO<sub>2</sub> RISCOVRA UN VALORE DI CONCENTRAZIONE DI INQUINANTE SUPERIORE AL VALORE LIMITE



CO2<sup>lim</sup>= livello di ppm di CO2 interni  
CO2 lim= set-point livello di ppm di CO2 interni  
DAQ= Out Air Quality, livello di ppm di CO2 esterni

Figura 86 Algoritmo - variabile misurata: CO<sub>2</sub>

3.1\_ IL SENSORE DI ILLUMINAMENTO RISCOVRA UN VALORE DI ILLUMINAMENTO INFERIORE AL VALORE LIMITE



Lux= livello di illuminamento interno  
Lux lim= set-point livello di illuminamento  
T lim= set-point temperatura interna  
T >= livello di radiazione solare diretta incidente sulla finestra  
T >= set-point livello di radiazione solare diretta incidente sulla finestra

Figura 87 Algoritmo - variabile misurata: illuminamento

6.6 Implementazione degli algoritmi di controllo nel modello di simulazione dinamica

Il processo di implementazione ha avuto lo scopo di verificare l'effetto degli algoritmi di controllo sviluppati attraverso gli alberi decisionali generali. Questi sono stati scomposti fino ad ottenere quattro logiche di controllo separate: una per i sistemi schermanti, una per il sistema di illuminazione, una per le finestre e una per l'impianto di riscaldamento.

Per questo motivo, si è deciso di analizzare le varie logiche componente per componente, definendo per ognuno i vari set-point e i vari sistemi di controllo. È stato possibile compiere questo passaggio grazie agli alberi decisionali costruiti in precedenza, i quali hanno permesso di tenere sempre sotto controllo le varie interazioni tra i componenti. Le logiche sono state implementate tramite tabelle della verità.

In questo report, per ragioni di sintesi, si è deciso di illustrare dettagliatamente solamente la costruzione della logica per l'apertura e la chiusura delle finestre, poiché è quella che più va ad influire sul risparmio energetico dovuto al riscaldamento. Le altre logiche verranno invece illustrate solo sinteticamente al fine di avere un quadro generale del lavoro svolto. Per quanto riguarda la definizione della logica di controllo riguardante l'apertura e la chiusura delle finestre si è deciso di ipotizzare l'utilizzo di una tecnologia che permette l'apertura e la chiusura automatica.

Si è inoltre deciso di ipotizzare questo tipo di automatismo poiché esistono già vari esempi di applicazioni di questo tipo, come ad esempio nelle aule dell'Università dell'Enterprise Center a Norwich, nel Regno Unito. Un'ulteriore ipotesi effettuata è stata quella di impostare l'apertura delle finestre sempre fino ad apertura totale. Ciò è stato fatto con l'obiettivo di massimizzare il ricambio d'aria quando necessario, e di ridurre al minimo il tempo di apertura delle finestre.

Dunque, la logica definita non è proporzionale, e le possibili azioni del sistema saranno due: 0 finestra chiusa, 1 finestra aperta. Questa metodologia è stata inoltre discussa nel libro "Aria, Calore e Luce. Il comfort ambientale degli edifici" scritto da Uwe Wienke [22].

Definita l'ipotesi di partenza per la logica sulle finestre sono state analizzate le variabili di ingresso che sono di seguito elencate:

#### *Stagione estiva e invernale*

- Le finestre si aprono quando c'è una bassa qualità dell'aria interna, ovvero quando la quantità di ppm di CO<sub>2</sub> presenti nell'aria interna (CO<sub>2</sub>) supera la quantità di ppm di CO<sub>2</sub> interna limite imposta (CO<sub>2</sub> lim).
- Le finestre si aprono se e solo se l'occupante è presente in casa.

#### *Stagione estiva*

- Le finestre si aprono quando la temperatura interna (Ti) è maggiore di quella esterna (Te), e se la temperatura interna (Ti) è maggiore della temperatura interna minima limite imposta nel periodo estivo (Ti lim) per il comfort dell'occupante.

#### *Stagione invernale*

- Le finestre si aprono quando l'umidità relativa interna (UR) supera il 70% e quando l'occupante non è in camera, in modo tale da aumentare il comfort abitativo.
- Le finestre si aprono quando la temperatura esterna (Te) è maggiore della temperatura esterna limite imposta (Te lim) e la temperatura interna (Ti) è minore del valore della temperatura interna limite imposto (Ti lim).

Definita la logica di controllo e le variabili di input necessarie, si sono definiti i valori di threshold specifici per il sistema di apertura/chiusura finestre.

Questi sono stati ricavati a partire dalla norma UNI EN 15 251 European Standard [19], sulla condizione di comfort. (Figura 88)

		Condizione di Comfort da norma UNI EN 15251
ESTATE INVERNO	Qualità dell'aria interna	$350 \text{ ppm} < \text{CO}_2 < 500 \text{ ppm}$
INVERNO	Umidità Relativa UR	$40\% < \text{UR} < 70\%$
ESTATE	Temperatura interna	$23^\circ\text{C} < \text{Ti} < 26^\circ\text{C}$
INVERNO	Temperatura interna	$20^\circ\text{C} < \text{Ti} < 24^\circ\text{C}$

Figura 88 Valori di Threshold

Per quanto riguarda la qualità dell'aria la norma definisce, per edifici adibiti ad uso abitativo, valori di concentrazione di ppm di CO<sub>2</sub> tra i 350 ppm e i 500 ppm. In questo caso, si è deciso di assumere come valore limite un valore intermedio di **400 ppm** di CO<sub>2</sub>.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, durante il periodo invernale, la norma definisce come valori di comfort i valori tra il 40% e il 70% di UR. Per questo motivo si è preso come valore limite l'estremo superiore pari al **70%** di umidità relativa.

Per quanto riguarda i set-point di temperatura per l'apertura e la chiusura delle finestre sono stati presi gli estremi dei valori di comfort imposti dalla normativa necessari per la determinazione della logica. Come valore di temperatura minima interna estiva, infatti, si è deciso di assumere la temperatura di **23°C**, mentre come valore di temperatura minima interna invernale si è deciso di assumere la temperatura di **20°C**.

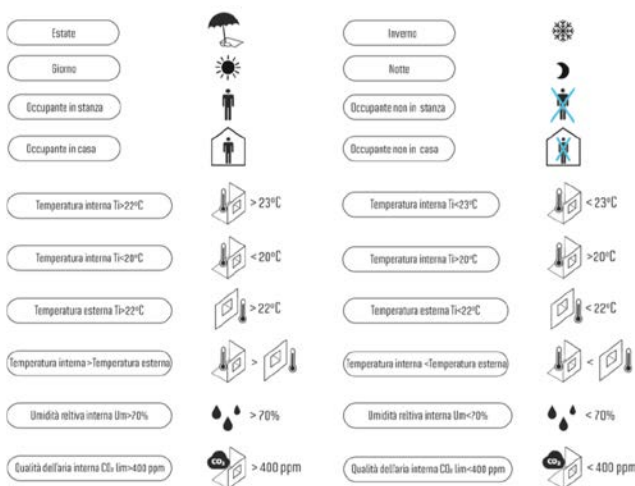


Figura 89 Variabili di ingresso

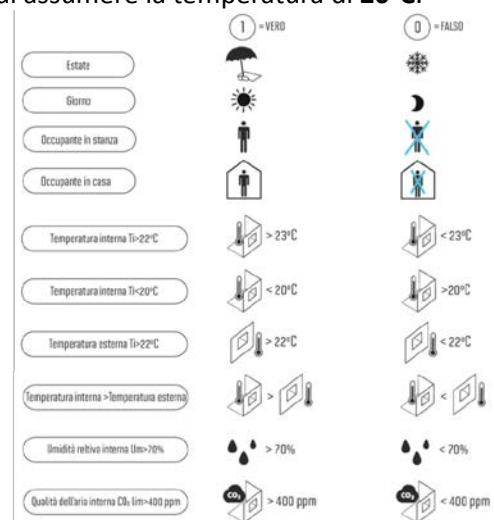


Figura 90 Sintesi delle variabili

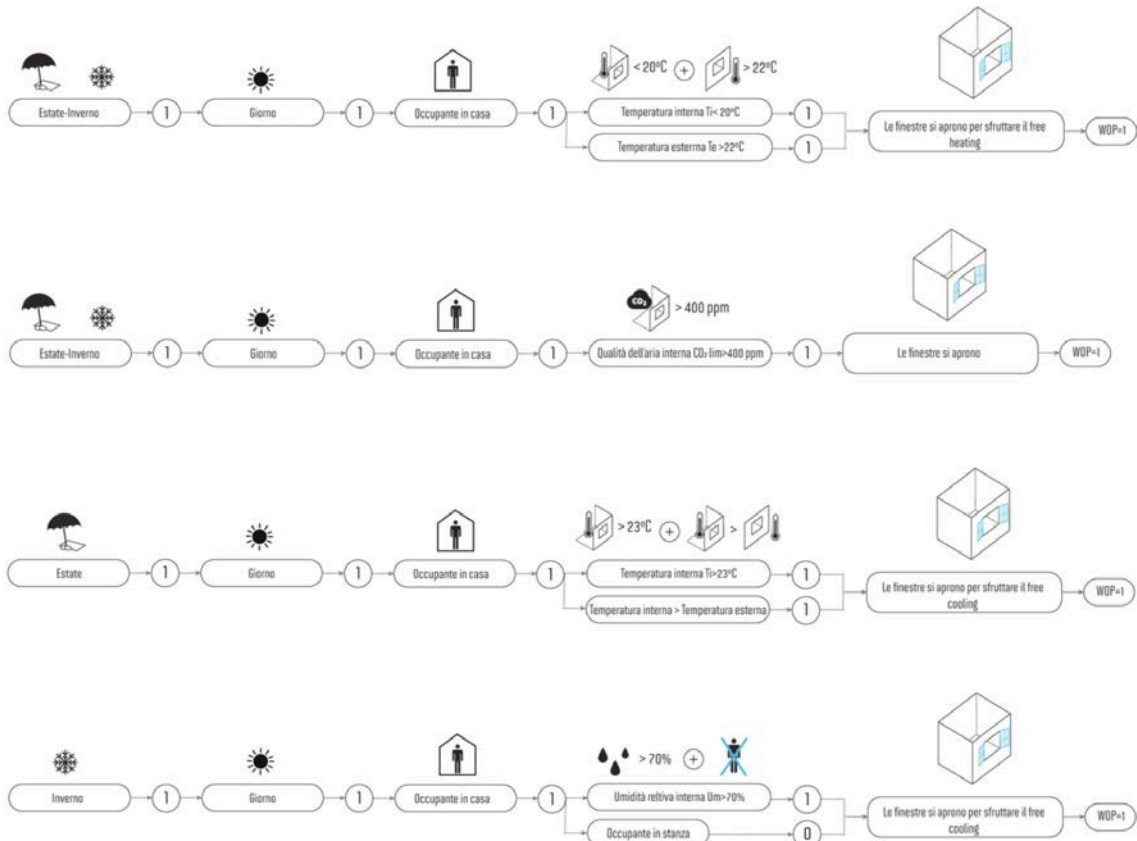


Figura 91 Logica di apertura chiusura finestre

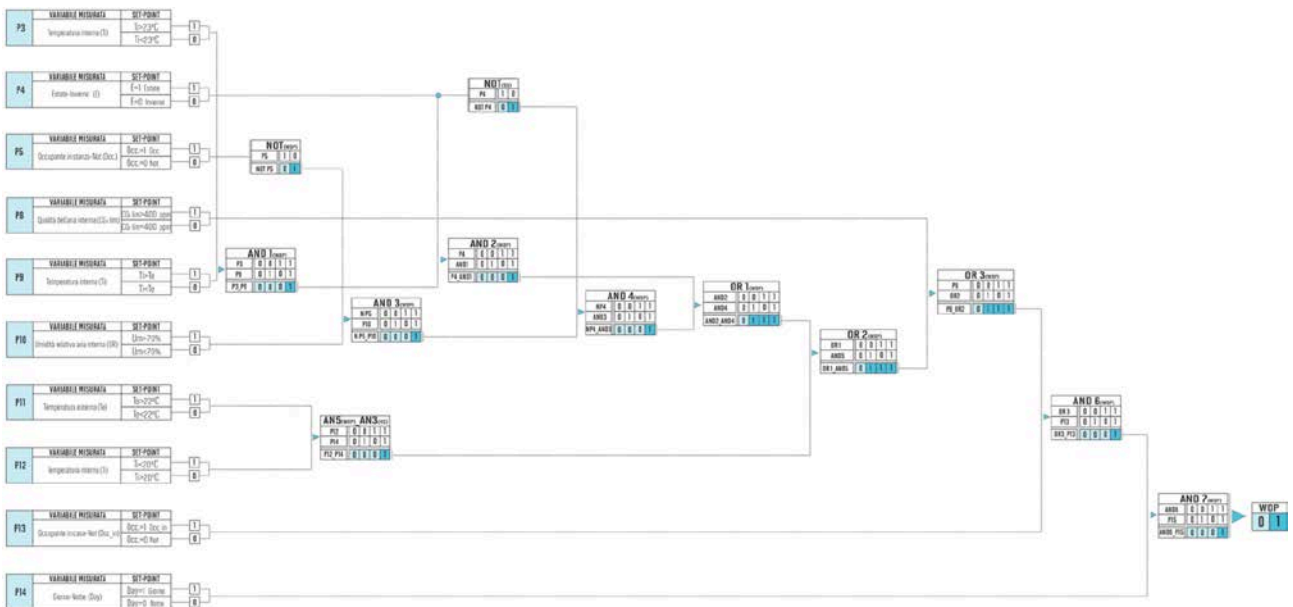


Figura 92 Schema di scrittura della logica sul programma Ida-Ice

Per quanto riguarda l'apertura/chiusura dei sistemi schermanti, l'accensione/spengimento delle luci e l'attivazione dell'impianto di riscaldamento il procedimento per la costruzione della logica è stato lo stesso di quello illustrato precedentemente per le finestre.

Per la sperimentazione della logica di movimentazione dei sistemi schermanti si è deciso di ipotizzare la

presenza di tende a rullo esterne filtranti perché le tapparelle, in caso di chiusura totale, causavano l'oscuramento dell'ambiente interno e obbligavano all'utilizzo dell'illuminazione artificiale.

A tale scopo è stata condotta un'analisi parametrica per individuare il valore di riferimento della radiazione solare incidente che attiva il processo di chiusura proporzionale delle schermature e che consente al contempo un sufficiente livello di illuminamento naturale.

#### Stagione estiva

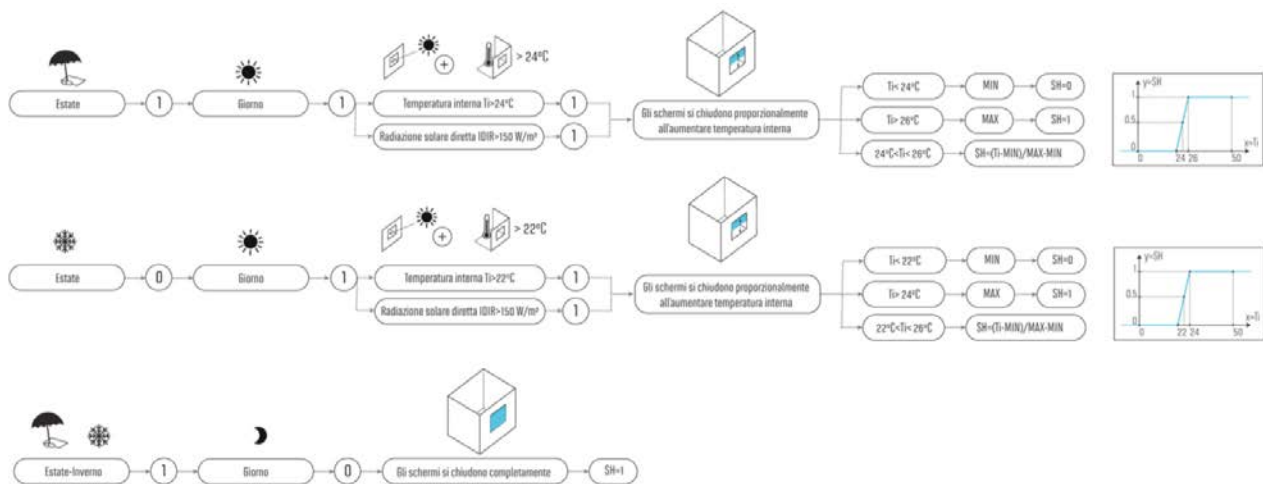
- Le tende esterne si abbassano proporzionalmente all'aumentare della temperatura interna quando viene superato il set-point della temperatura stessa e quando viene superato il set-point della radiazione solare diretta incidente sulla finestra.
- Le tende esterne iniziano ad abbassarsi, dunque, quando la temperatura interna ( $T_i$ ) supera la temperatura interna limite imposta per la stagione estiva ( $T_i > T_{i \text{ lim}}$ ) e la radiazione solare diretta incidente sulla finestra (IDIR) è maggiore della radiazione solare diretta incidente sulla finestra limite imposta ( $IDIR > IDIR \text{ lim}$ ).

#### Stagione invernale

- Le tende esterne si abbassano proporzionalmente all'aumentare della temperatura interna quando viene superato il set-point della temperatura stessa e quando viene superato il set-point della radiazione solare diretta incidente sulla finestra.
- Le tende esterne iniziano ad abbassarsi, dunque, quando la temperatura interna ( $T_i$ ) supera la temperatura interna limite imposta per l'inverno ( $T_i > T_{i \text{ lim}}$ ) e la radiazione solare diretta incidente sulla finestra (IDIR) è maggiore della radiazione solare diretta incidente sulla finestra imposta ( $IDIR > IDIR \text{ lim}$ ).

#### Stagione estiva e invernale

- Le tende esterne si abbassano durante tutto il periodo notturno.



**Figura 93** Logica di apertura/chiusura tende a rullo esterne

Per quanto riguarda la regolazione del sistema di illuminazione artificiale in accordo a [23].

#### Stagione estiva e invernale

- Le luci si accendono, con intensità inversamente proporzionale all'illuminamento interno, quando la quantità di illuminamento (Lux) all'interno della stanza è minore del valore di illuminamento limite imposto (Lux lim) e quando l'occupante è presente in stanza. Se l'occupante non è in stanza le luci non si accendono.
- Quando l'occupante dorme le luci sono spente





Figura 94 Schema di accensione/spegnimento luci

Dopo aver progettato e implementato sul software tutte le logiche dei singoli sistemi è stato disegnato uno schema di scrittura generale al fine di controllare che le interazioni tra i vari sistemi, previste in partenza, venissero rispettate. (Figura 95)

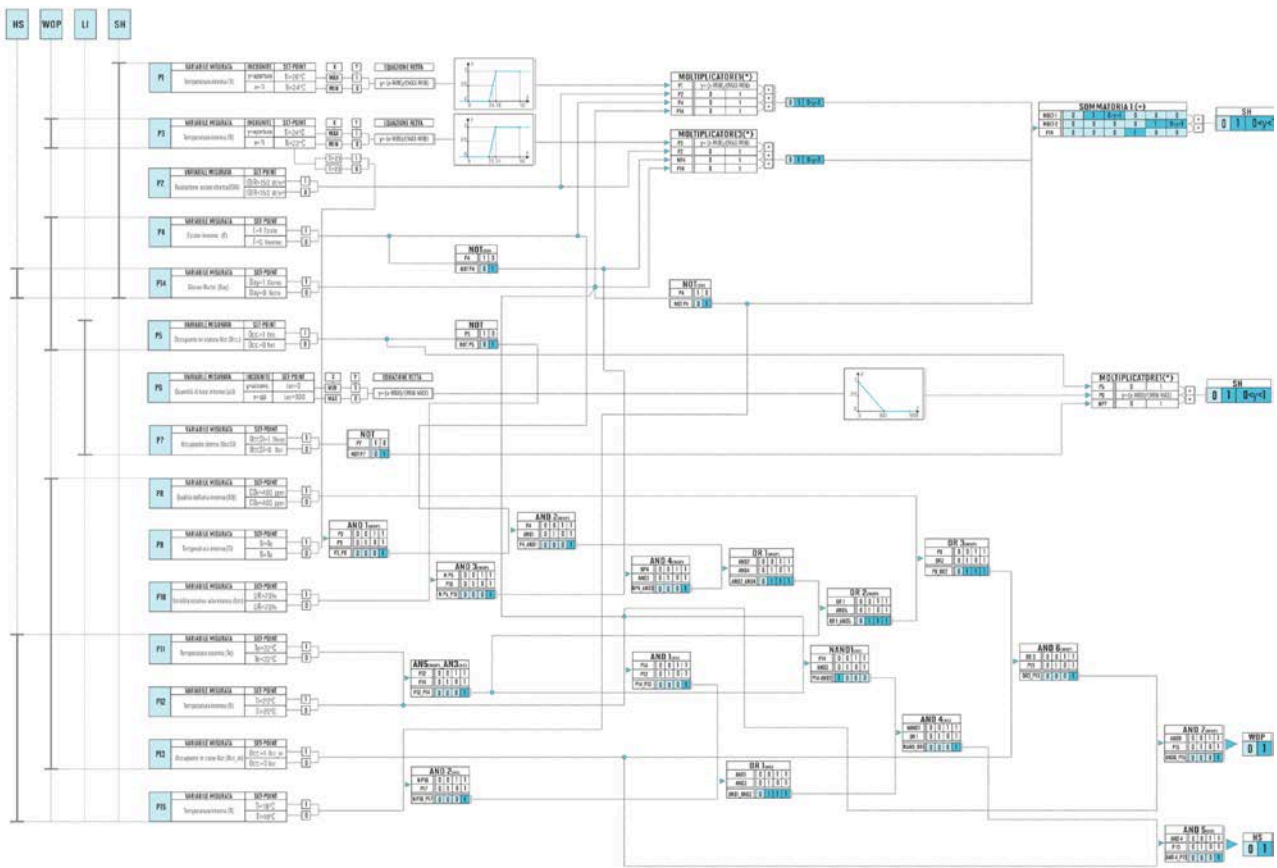
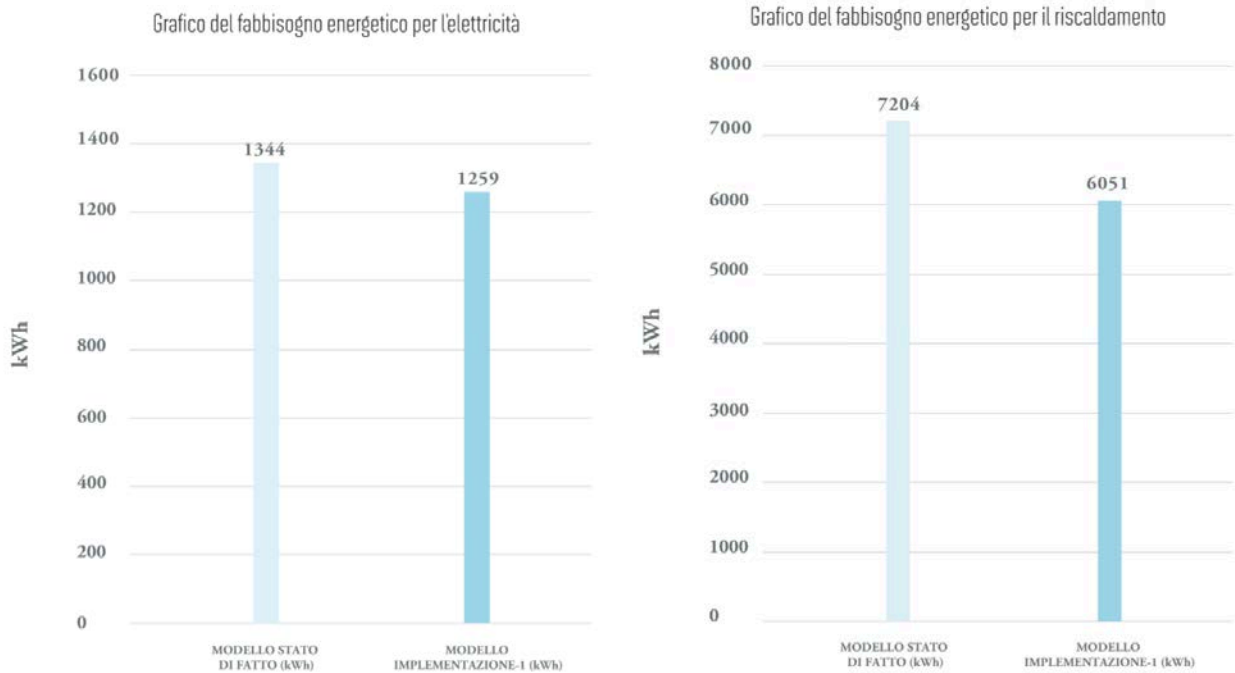


Figura 95 Schema di scrittura generale della logica sul programma Ida-Ice

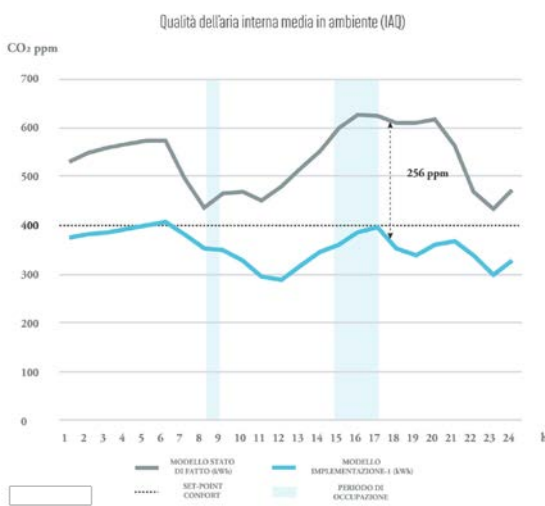
## 6.7 Analisi dei risultati: modello di implementazione

Dopo aver studiato e definito tutte le precedenti logiche, è stato possibile valutare l'impatto sul fabbisogno energetico totale. Il risparmio energetico ottenuto per il riscaldamento è risultato pari al 16 % mentre quello ottenuto per l'energia elettrica (dovuto in questo caso alla sola logica dell'accensione/spegnimento luci) è risultato pari al 7,3% del totale. (Figura 96)

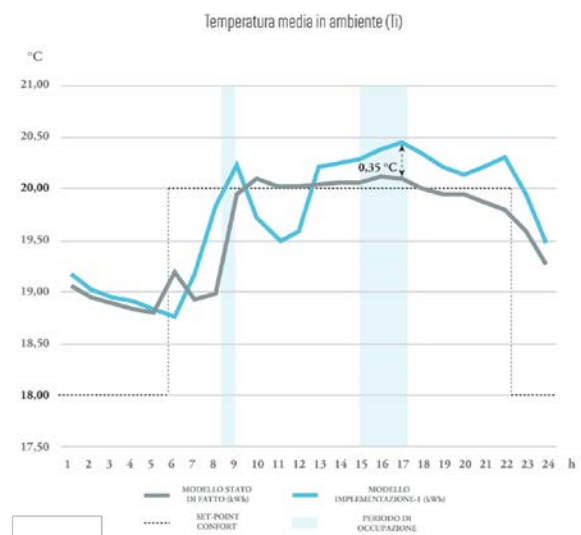


**Figura 96** Tabella e grafici di confronto tra il consumo energetico iniziale e quello generato dal modello implementato con le nuove logiche di controllo.

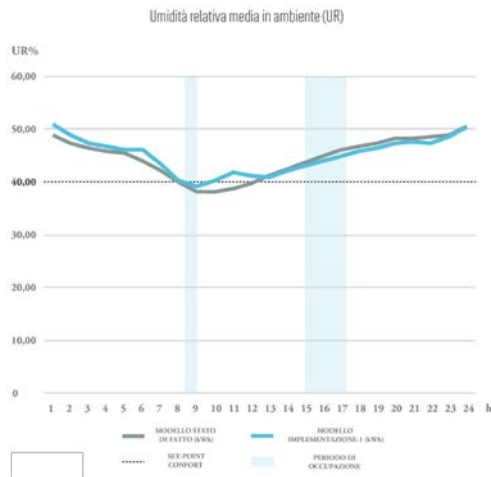
Si è inoltre effettuata un'analisi del comfort interno. Questa è stata condotta tramite un'analisi parametrica al fine di stabilire se, dopo l'implementazione delle logiche, i principali parametri di comfort interno come la qualità dell'aria, la temperatura, l'umidità relativa e l'illuminamento fossero peggiorati oppure migliorati. L'analisi è stata condotta sia per l'estate che per l'inverno. Per il periodo estivo è stata considerata la giornata del 20 luglio 2015, mentre per il periodo invernale quella 21 gennaio 2015. La stanza presa in esame è il soggiorno. (Figura 97, Figura 99)



**Figura 97** Qualità dell'aria interna media in ambiente-Invernale

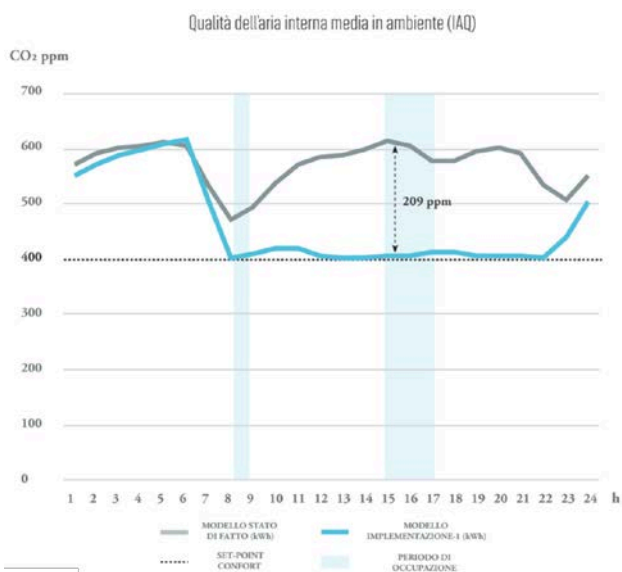


**Figura 98** Temperatura media in ambiente-Invernale

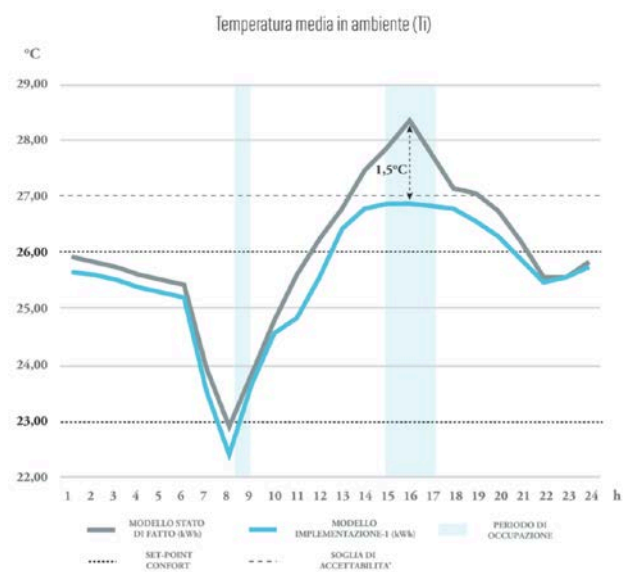


**Figura 99** Umidità relativa media-Invernale

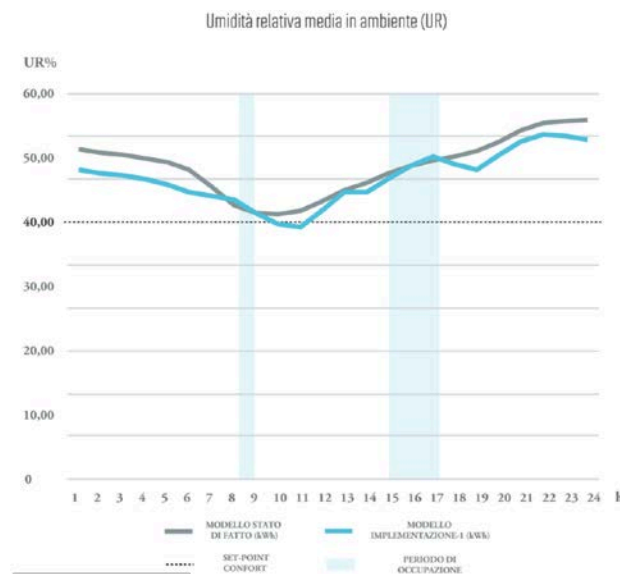
Per il periodo invernale, dall'analisi si evince che con il sistema di ventilazione studiato ha consentito di ottenere una maggior qualità dell'aria interna in termini di concentrazione di CO<sub>2</sub> garantendo nel contempo comfort termo-igrometrico. Questo è un chiaro indicatore del funzionamento della logica. Si è riusciti, infatti, a aumentare la qualità dell'aria interna e dunque il comfort dell'occupante, diminuendo il consumo energetico totale. (Figura 100)



**Figura 100** Qualità dell'aria interna media in ambiente-Estiva



**Figura 101** Temperatura media in ambiente-Estiva



**Figura 102** Umidità relativa media in ambiente-Estiva

Per il periodo estivo, dall'analisi si evince che grazie alle logiche studiate la temperatura interna si è abbassata durante il periodo di occupazione e che, ancora una volta, con il sistema di ventilazione studiato si registra una maggior qualità dell'aria interna. Nello specifico, per la giornata estiva considerata, le schermature hanno contribuito all'abbassamento della temperatura interna fino 1,5°C, mantenendo comunque la condizione minima di comfort visivo interno in assenza di sistemi di condizionamento.

Il livello di illuminamento durante il periodo di occupazione resta sempre sopra il limite di soglia. I risultati, dunque, confermano il funzionamento della logica anche nel periodo estivo.

## 6.8 Fase 2: progettazione degli algoritmi di controllo

La seconda fase ha avuto la finalità di verificare le opportunità di operare strategie di Demand Response per l'edificio residenziale in esame. Nella sperimentazione è stato possibile creare questa parte di logica grazie alla presenza di alcuni elettrodomestici programmabili e di un impianto di pannelli fotovoltaici. La logica è stata sviluppata allo scopo di massimizzare l'auto consumo di energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici.

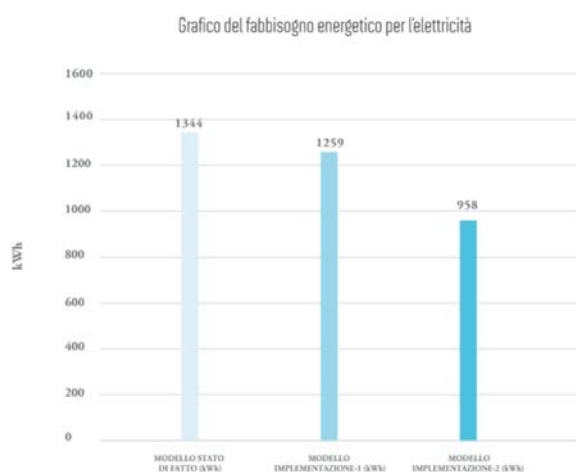
Dato il numero di cicli settimana di alcuni elettrodomestici, precedentemente impostato, la logica sposta questi cicli nei periodi temporali di massima produzione dei pannelli fotovoltaici. Nel caso in cui la produzione di energia data dai pannelli non fosse sufficiente per effettuare il numero di cicli impostato, questi avvengono normalmente tramite l'uso dell'energia elettrica fornita dalla rete. Il numero dei cicli totale, dunque, rimarrà invariato ma, con l'obiettivo di sfruttare al massimo l'energia rinnovabile, cambierà il periodo della giornata in cui questi avverranno.

Gli elettrodomestici sottoposti a questa logica nel nostro caso studio sono stati la lavatrice e la lavastoviglie, ovvero gli unici apparecchi programmabili, presenti all'interno dell'abitazione.

## 6.9 Analisi dei risultati: modello di implementazione fase1+fase 2

Dopo aver progettato e implementato il sistema di gestione dei carichi elettrici dovuti agli elettrodomestici è stato effettuato il calcolo del fabbisogno energetico totale, sia con la prima logica che con la seconda logica. Il risparmio di energia elettrica derivante dall'implementazione di entrambe le logiche (fase1 e fase 2) è risultato pari a circa il 26 %

È stato quindi dimostrato che una buona gestione e logiche di controllo ottimizzate consentono di ottenere un risparmio sul fabbisogno energetico e un migliore livello del confort abitativo. Le percentuali del risparmio energetico ottenute, inoltre, sono in linea con quelle riportate in letteratura. (Figura 103)



**Figura 103** Confronto tra il consumo energetico iniziale e quello generato dal modello implementato 1 e dal modello implementato 2

Il limite principale dell'esperimento effettuato riguarda il tipo di appartamento e il tipo di utenza presi in esame. Lo studio, infatti, ha analizzato un piccolo appartamento abitato da un'unica persona [16]. L'esperimento condotto può essere considerato come la base di partenza per testare i sistemi di gestione automatica di un edificio su una scala più ampia. Questo caso studio, infatti, è servito per verificare il funzionamento delle logiche di controllo progettate su un edificio reale e per capire la loro efficienza ed efficacia.

## 7 Conclusioni

L'applicazione di analisi statistiche alle abitazioni di E2016 e C2017 ha consentito di estrarre informazioni dai dati di monitoraggio disponibili, al fine di descrivere, conoscere e analizzare alcune loro componenti, nello specifico qualità ambientale e consumi per la climatizzazione. Le analisi condotte sui secondi hanno previsto l'adozione di tecniche non supervisionate con l'obiettivo di analizzare statisticamente la probabilità di ottenere certi consumi all'occorrere di variabili prefissate (es. fascia di consumo, temperatura esterna). L'analisi dei parametri ambientali è stata invece condotta in funzione della variabile tempo tenendo conto per ogni caso studio dell'esposizione, della tipologia costruttiva (dipendente dall'epoca) e dell'occupazione. Lo studio riferito in questo report ha consentito in primo luogo di individuare un processo di analisi dei data set provenienti da attività di monitoraggio in edifici residenziali finalizzato alla verifica della loro qualità e ad una loro maggiore caratterizzazione. Grazie a questa metodologia è stato possibile preparare un data base robusto per le successive analisi; questo processo ha consentito di estrarre informazioni utili a fornire dei *feedback* nelle fasi di test dei sistemi di monitoraggio, rilevandone possibili problematiche di acquisizione e potenzialità di miglioramento.

In secondo luogo, lo studio ha individuato metodologie di analisi utili alla descrizione delle serie di dati, quali indicatori (percentuale di record, numero di ore per classe di comfort), rappresentazioni (andamenti di temperatura media oraria, *Calendar plot*) e tecniche di classificazione e segmentazione (CART, SAX). La crescente penetrazione di sistemi di monitoraggio negli edifici consente di ottenere una quantità di dati tale da permettere una conoscenza più approfondita e dettagliata delle abitudini e delle caratteristiche del sistema considerato, richiedendo di individuare gli strumenti adatti alla loro analisi.

Vale la pena sottolineare, però, che la qualità dei dati gioca un ruolo fondamentale, poiché una alta presenza di dati non validi, derivanti da monitoraggio incostante o con letture anomale, vanificano il monitoraggio e rendono difficoltoso l'ottenimento di risultati consistenti dalla loro analisi.

La sezione 5 del report ha trattato il *benchmarking* quale tecnica di diagnostica applicata alle abitazioni E2016 e C2017 con l'obiettivo di valutarne la prestazione in termini di qualità ambientale e consumo energetico raffrontandole tra di loro (benchmark interno) e con valori di riferimento (benchmark esterno), rendendo necessaria l'individuazione di opportuni indicatori di (KPIs). Inoltre, le analisi hanno fornito non solo uno strumento per effettuare un confronto tra gli edifici sulla base dei dati a disposizione, ma anche uno strumento stimativo per effettuare confronti sulla base di dati futuri, tenendo conto sia dell'utilizzo che delle condizioni al contorno.

Infine, per un edificio facente parte del parco analizzato è stato sviluppato un modello energetico calibrato e sono state simulate diverse strategie di automazione e controllo relative a differenti dispositivi. I risultati hanno dimostrato che logiche gestione ottimizzate possono comportare sensibili risparmi di energia garantendo nel contempo una buona qualità dell'ambiente interno.

## 8 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] *UNI EN ISO 7730: 2006: Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*, 28 febbraio 2006.
- [3] *UNI EN 15251: 2006: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, novembre 2006.
- [4] The Weather Company, «Weather underground,» settembre 2018. [Online]. Available: <https://www.wunderground.com/>.
- [5] *UNI EN 15251: 2006. Annex A: Recommended criteria for the thermal environment*, novembre 2006.
- [6] R. Yan, Z. Ma, Y. Zhao e G. Kokogiannakis, «A decision tree-based data-driven diagnostic strategy for Air Handling Unit,» *Energy and Buildings*, 2016.
- [7] P. Tan, M. Steinbach e V. Kumar, in *Introduction to Data Mining*, Pearson, 2005.
- [8] J. Han, M. Kamber and J. Pei, in *Data mining: concepts and techniques*, Morgan Kaufmann, 2011.
- [9] 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.
- [10] *D.M. 162/2015, Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, 26/06/2015.
- [11] Ministero dello sviluppo economico, *Piano d'azione Italiano per l'Efficienza Energetica*, 2017.
- [12] A. Capozzoli, T. Cerquitelli e M. Piscitelli, «Chapter 11 - Enhancing energy efficiency in buildings through innovative data analytics technologies,» in *Pervasive Computing*, Academic Press, 2016.
- [13] T. Swinscow e M. J. Campbell, *Statistics at square one*, University of Southampton, 1997.
- [14] Y. Xin e G. Xiao, *Linear regression analysis. Theory and Computing*, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009.
- [15] «IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE), version 4.8,» EQUA, <https://www.equa.se>, 2018.
- [16] F. F., *Implementazione di strategie di gestione energetica intelligente in edifici residenziali esistenti*, Torino: Relatore: A. Capozzoli, Dipartimento Architettura e Design- Politecnico di Torino, 2018.
- [17] C. G. e F. A., «Sviluppo di un simulatore rete di edifici residenziali e implementazione preliminare di un modello di smart district, Report Rds/2015/21,» Università Politecnica delle Marche, 2015.

- [18] F. E. e M. V., «Methodologies and Advancements in the Calibration of Building Energy Models,» *Energies*, vol. 8, 2015.
- [19] UNI EN 15251:2008, *Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica*, 2008.
- [20] M.-. M. d. c. d. E. e. i. 1. a. i.-C. d. c. d. p. e. e. a. d. illuminazione, Dipartimento di energetica Milano, Settembre 2004.
- [21] C. A., C. S.P., F. V., L. F. e S. G., «Sviluppo di metodologie di aggregazione e benchmarking dei dati energetici di rete di edificio modelli di feedback per il coinvolgimento degli utenti residenziali”.Report Rds/2015/21,» ENEA, 2015.
- [22] W. U., Aria, Calore, Luce. Il comfort ambientale negli edifici, Roma: Tipografia DEI del genio civile, 2005.
- [23] A. C., V. J., F. G.V., P. A., B. L., S. J. e J. K., «Management and monitoring in public buildings through ICT based system: Control rules for energy saving with lightinh and HVAC services,» *Frontiers of architectural*, 2013.



## 9 Curriculum vitae degli Autori del Rapporto Tecnico

### *Alfonso Capozzoli*

Alfonso Capozzoli (1979), ingegnere meccanico e dottore di ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici, è attualmente professore associato di Fisica Tecnica Ambientale presso il Politecnico di Torino. Nel 2018 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale alle funzioni di professore universitario di I fascia.

È docente nei corsi di laurea in Architettura per il progetto sostenibile e in Ingegneria Energetica del Politecnico di Torino. Nel Dipartimento di Energia opera nel gruppo di ricerca TEBE ed è autore di circa 80 pubblicazioni scientifiche sugli impianti di climatizzazione, sulla simulazione energetica dinamica della prestazione degli edifici, sulla fisica dell'edificio, sul controllo dell'umidità e sull'applicazione di modelli inversi e tecniche di data analytics per la gestione e la diagnostica energetica degli edifici. È stato chairman in diverse sessioni tecniche in conferenze internazionali sulla prestazione energetica degli edifici e membro di comitati organizzatori/scientifici. Nel 2016 ha ricoperto il ruolo di general chair di una conferenza internazionale (SEB 16). È stato membro del consiglio direttivo della sezione italiana di IBPSA (International Building Performance Simulation Association).

È attivo in progetti di ricerca sulla prestazione energetica degli edifici finanziati dalla Commissione Europea e in vari gruppi di ricerca dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA). È responsabile scientifico di diversi contratti di ricerca per il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino. È revisore per prestigiose riviste internazionali nei settori della fisica dell'edificio, ed è stato valutatore di progetti di ricerca del settore. Per il Politecnico di Torino svolge il ruolo di *academic advisor* per i programmi Erasmus relativamente alla mobilità degli studenti da/verso il DAD (co-responsabile per l'area EUROPA).

### *Stefano Paolo Corgnati*

Stefano Paolo Corgnati (01.03.1973) vercellese, laureato con lode in ingegneria meccanica con indirizzo energia e dottore di ricerca in energetica, è Professore Ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino. Svolge attività di docenza nell'ambito dell'energetica edilizia, prevalentemente nei Corsi di Studio di Architettura e Ingegneria Energetica.

È Vice Rettore per la Ricerca e membro del Consiglio di Amministrazione del Politecnico di Torino, nonché membro per l'Ateneo stesso del Comitato Esecutivo dell'Energy Centre e dell'Advisory Board del China Centre. Per il Politecnico di Torino, è inoltre membro del Consiglio di Amministrazione della Fondazione Links e dell'Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione, nonché membro del Comitato di Indirizzo di Torino Smart City.

Nel Dipartimento di Energia opera nel gruppo di ricerca TEBE ([www.polito.it/tebe](http://www.polito.it/tebe)) che svolge attività di ricerca nei settori dell'uso razionale dell'energia, dei sistemi energetici per l'approvvigionamento degli edifici, delle tecnologie edilizie ed impiantistiche per il condizionamento ambientale. È autore di oltre trecento pubblicazioni a carattere scientifico, didattico e divulgativo.

È stato coordinatore del Centro di Ricerca "Indoor Environment & Energy Management Competence Centre" di Telecom presso il Politecnico di Torino. Guida il gruppo di ricerca IEEM "Indoor Environment & Energy Modeling" ed è co-direttore del Laboratorio di Analisi e Modellazione Energetica (LAME) del Dipartimento Energia.

Partecipa al progetto Europeo Socrates/Erasmus per la mobilità dei docenti: ha tenuto e tiene seminari e corsi di approfondimento presso la Istanbul Technical University, la Danish Technical University, l'Università di Coimbra e la ETSAB di Barcellona.

È stato co-proponente e vincitore del finanziamento per il progetto "Politoward" per l'Internazionalizzazione del Politecnico di Torino, progetto ideato e attuato con l'Università di Cambridge.

È impegnato in numerosi progetti europei (Polycity, DATAMINE; TABULA, BECA, MOBISTYLE) inerenti le prestazioni energetiche degli edifici esistenti e dei sistemi energetici correlati.

Per le sue ricerche, nel 2009 è vincitore del premio REHVA "Young Scientist Award".

È Presidente di Rehva, la Federazione Europea delle Associazioni del Condizionamento dell'Aria, dove dal 2011 è Vice-Presidente e nel periodo 2013-16 è stato Tesoriere. In Rehva, è chair della TaskForce su Indoor Climate Quality Assessment e di quella "Reference Buildings for energy analysis".

Per la International Energy Agency, già Subtask leader nel progetto ECBCS-Annex 53 "Total Energy Use in Buildings", è Co-Subtask leader nel progetto ECBCS-Annex 59 "High Temperature Colling and Low Temperature Heating Systems".

### *Francesco Fabbro*

Francesco Fabbro (03/12/1993) ha conseguito la Laurea Triennale in Scienze dell'Architettura presso l'Università degli Studi di Trieste con Lode (2015). Ha continuato i suoi studi specialistici al Politecnico di Torino dove, dopo aver svolto un tirocinio all'estero (Ljubljana) nello studio di fama europea Dekleva Gregoric Architect, si è laureato con lode in Architettura per il Progetto Sostenibile (2018). Ha elaborato un progetto di tesi nell'ambito della gestione energetica intelligente in edifici residenziali.

### *Daniele Mauro Mazzarelli*

Daniele Mauro Mazzarelli (1992), si laurea al Politecnico di Torino con il titolo di dottore in Ingegneria Energetica con indirizzo Progettazione Termotecnica. Ha svolto un lavoro di tesi magistrale inerente all'applicazione di tecniche di Data Analytics per l'identificazione e la diagnosi di anomalie energetiche in sistemi HVAC. Da maggio 2018 svolge attività di ricerca come borsista presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino sul tema dell'analisi di dati di prestazione energetica degli edifici attraverso tecniche di Data Mining.

### *Giulia Vergerio*

Giulia Vergerio (1992), ottiene, con lode, il titolo di dottore magistrale in Architettura Costruzione Città (Politecnico di Torino, marzo 2017) con una tesi dal titolo "La questione energetico-ambientale-economica nell'edilizia residenziale: sviluppo di una metodologia di valutazione semplificata per interventi a scala urbana", svolta presso il Dipartimento Energia del Politecnico. A partire dal giugno 2018 è stata borsista di ricerca presso il medesimo dipartimento, collaborando con differenti partner sul tema della pianificazione energetica per gli edifici, occupandosi di valutazioni sia energetiche che economiche degli interventi. È stata di recente ammessa alla scuola di dottorato di Energetica presso il Politecnico di Torino con borsa finanziata dal centro interdipartimentale "Energy Center Lab".

### *Sara Viazzo*

Sara Viazzo (1976), laureata in ingegneria civile presso il Politecnico di Torino, ha poi conseguito il Dottorato di Ricerca in Innovazione tecnologica per l'architettura con una tesi sulla climatizzazione degli ambienti museali. Nello stesso ateneo è attualmente titolare di un assegno di ricerca presso il Dipartimento di Energia, dove si occupa di prestazioni energetiche dell'ambiente costruito curandone gli aspetti di trasferimento tecnologico nei confronti di istituzioni pubbliche e private.

Dal 2007 è docente incaricato presso il Politecnico di Torino e ha tenuto numerosi corsi nel settore della fisica tecnica ambientale.

Svolge attività di consulenza come libero professionista occupandosi di risparmio energetico, di analisi del comfort ambientale e di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici. Collabora, altresì, con importanti istituzioni museali come consulente per la gestione del microclima degli ambienti per la conservazione e l'esposizione di opere d'arte e beni culturali.

Collabora con Edilclima S.r.l., azienda italiana leader nella produzione di software per la termotecnica, nella quale si occupa di analisi di normativa tecnica e di collaudo dei software, nonché di attività editoriali e di formazione.