



Ricerca di Sistema elettrico

Testing sito web e popolazione database per la definizione di benchmark di consumo delle utenze residenziali

F. Mancini, M. Cecconi, G. Lo Basso, L. de Santoli

TESTING SITO WEB E POPOLAZIONE DATABASE PER LA DEFINIZIONE DI BENCHMARK DI CONSUMO DELLE UTENZE RESIDENZIALI

F. Mancini, M. Cecconi, G. Lo Basso, L. de Santoli
Centro di ricerca Territorio Edilizia Restauro Ambiente (CITERA)
Sapienza Università di Roma

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Local Energy District

Linea di attività: LA9 – “Smart Homes: testing sito web e popolazione database per la definizione di benchmark di consumo delle utenze residenziali”

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Architettura - CITERA della Sapienza Università di Roma per una attività di ricerca dal titolo: “Valutazione della flessibilità della domanda di piccoli distretti energetici rivolto ad utenze di tipo residenziale e terziario”

Responsabile scientifico ENEA: Sabrina Romano

Responsabile scientifico CITERA: Francesco Mancini

Indice

SOMMARIO.....	6
1 INTRODUZIONE.....	7
2 ATTIVITÀ DI AMPLIAMENTO E ANALISI SUL DATABASE DEI CASI REALI	9
2.1 CARATTERISTICHE GENERALI DELLE ABITAZIONI	9
2.2 DOTAZIONI DELLE ABITAZIONI E USI	12
2.2.1 <i>Riscaldamento abitazione</i>	12
2.2.2 <i>Raffrescamento abitazione</i>	13
2.2.3 <i>Preparazione acqua calda sanitaria</i>	14
2.2.4 <i>Impianti fotovoltaici</i>	15
2.2.5 <i>Cucina</i>	16
2.2.6 <i>Refrigerazione</i>	17
2.2.7 <i>Lavaggio, pulizia stiratura</i>	18
2.2.8 <i>Illuminazione</i>	20
2.2.9 <i>Postazioni Audio-Video</i>	20
2.2.10 <i>Computer - Internet</i>	20
2.2.11 <i>Cura della persona</i>	21
2.2.12 <i>Altri apparecchi</i>	21
2.3 VALUTAZIONE DELL'INCIDENZA DEI SINGOLI SERVIZI SUI CONSUMI COMPLESSIVI	22
2.4 DEFINIZIONE DI BENCHMARK DI CONSUMO	23
2.4.1 <i>Consumi di gas</i>	24
2.4.2 <i>Consumi di energia elettrica</i>	25
2.4.3 <i>Consumi di energia primaria</i>	27
2.4.4 <i>Eletrificazione delle abitazioni</i>	30
2.4.5 <i>Carichi elettrici accumulabili</i>	32
2.4.6 <i>Carichi elettrici differibili</i>	33
2.4.7 <i>Emissioni inquinanti</i>	35
2.4.8 <i>Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)</i>	37
3 IMPLEMENTAZIONI DEL FOGLIO DI CALCOLO E PUBBLICAZIONE SU PIATTAFORMA WEB	40
3.1 AGGIORNAMENTI DEL FOGLIO DI CALCOLO.....	40
3.2 FUNZIONI AGGIUNTIVE DEL FOGLIO DI CALCOLO	41
3.3 MODIFICHE PER ADATTAMENTO A PIATTAFORMA WEB	43
3.4 PREDISPOSIZIONE PER COLLEGAMENTO CON SITO ISTITUZIONALE ARERA	44
3.5 PIATTAFORMA WEB DI CALCOLO	45
3.5.1 <i>Struttura della piattaforma web</i>	46
3.5.2 <i>Funzionamento della piattaforma web</i>	47
3.6 TESTING PIATTAFORMA WEB.....	48
4 ANALISI DI SCENARI EVOLUTIVI – IL CONTRIBUTO POTENZIALE DEL SETTORE RESIDENZIALE ITALIANO IN UN'ATTIVITÀ DI DEMAND RESPONSE	50
4.1 COME IL SETTORE RESIDENZIALE ITALIANO POTREBBE CONTRIBUIRE ALLA FLESSIBILITÀ DEL CARICO NELLE ATTIVITÀ DI DEMAND RESPONSE: UNA METODOLOGIA PER L'AGGREGAZIONE DI UTENZE RESIDENZIALI E LO SVILUPPO DI UNA STRATEGIA DI FLESSIBILITÀ.....	50
4.1.1 <i>Procedura di aggregazione delle utenze</i>	50
4.1.2 <i>Descrizione del database e degli archetipi</i>	52
4.1.3 <i>Profili di consumo giornaliero per i 14 archetipi</i>	55
4.1.4 <i>Aggregazione virtuale delle utenze</i>	58
4.1.5 <i>Andamento dei prezzi dell'energia nel mercato italiano</i>	60
4.1.6 <i>Identificazione della strategia di spostamento temporale dei carichi</i>	62
4.2 IMPLEMENTAZIONE E SIMULAZIONE DI SCENARI REALI DI TRASFERIMENTO DEL CARICO BASATI SU UNA STRATEGIA DI FLESSIBILITÀ – IL SETTORE RESIDENZIALE ITALIANO COME CASO DI STUDIO.....	64
4.2.1 <i>Flexible Loads by Classification</i>	67

4.2.2	<i>Flexible Loads by Strategy & Scenario</i>	69
4.2.3	<i>Energy Shift</i>	72
4.2.4	<i>Peak Shaving</i>	75
4.3	METODOLOGIA E SIMULAZIONE DELLA STRATEGIA DI RIDUZIONE DEI PICCHI DI PRELIEVO DALLA RETE ELETTRICA BASATA SULL'OTTIMIZZAZIONE DEL FOTOVOLTAICO E DELLO STOCCAGGIO: UN CASO DI STUDIO NEL SETTORE RESIDENZIALE ITALIANO	79
4.3.1	<i>Introduzione</i>	79
4.3.2	<i>Metodologia</i>	79
4.3.3	<i>Risultati delle simulazioni e discussione</i>	81
4.4	CONSIDERAZIONI DI RIEPILOGO E CONCLUSIVE	87
5	ANALISI DI SCENARI EVOLUTIVI PER LE ABITAZIONI – L'UTILIZZO DEI CLIMATIZZATORI A POMPA DI CALORE COME GENERATORE PRIORITARIO	88
5.1	SCENARIO #R0 – SITUAZIONE ATTUALE E UTILIZZO DEI GENERATORI A GAS COME GENERATORE PRIORITARIO DI RISCALDAMENTO.....	88
5.1.1	<i>Consumi di energia primaria per riscaldamento e complessivi</i>	88
5.1.2	<i>Carichi flessibili dell'abitazione</i>	90
5.2	SCENARIO #R1 – UTILIZZO DEI CLIMATIZZATORI PRESENTI COME GENERATORE PRIORITARIO DI RISCALDAMENTO.....	91
5.2.1	<i>Consumi di energia primaria per riscaldamento e complessivi</i>	91
5.2.2	<i>Emissioni inquinanti dell'abitazione</i>	93
5.2.3	<i>Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)</i>	94
5.2.4	<i>Carichi flessibili dell'abitazione</i>	95
5.3	SCENARIO #R2 – INTRODUZIONE DI UN ULTERIORE CLIMATIZZATORE IN TUTTE LE ABITAZIONI E UTILIZZO DEI CLIMATIZZATORI COME GENERATORE PRIORITARIO DI RISCALDAMENTO	97
5.3.1	<i>Consumi di energia primaria per riscaldamento e complessivi</i>	97
5.3.2	<i>Emissioni inquinanti dell'abitazione</i>	99
5.3.3	<i>Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)</i>	100
5.3.4	<i>Carichi flessibili dell'abitazione</i>	101
5.4	AGGREGAZIONE VIRTUALE DELLE UTENZE E CURVE DI CARICO PER GLI SCENARI #R0, #R1, #R2.....	103
5.4.1	<i>Curve di carico aggregate per lo scenario #R0</i>	103
5.4.2	<i>Variatione delle curve di carico aggregate per gli scenari #R1 e #R2</i>	108
5.5	CONSIDERAZIONI DI RIEPILOGO E CONCLUSIVE	118
6	ANALISI DI SCENARI EVOLUTIVI PER LE ABITAZIONI – GLI EFFETTI POTENZIALI DEL SUPERBONUS 110%	119
6.1	SCENARIO #R3 – RIQUALIFICAZIONE INTEGRALE DELL'ABITAZIONE CON MANTENIMENTO DEI VETTORI ENERGETICI.....	120
6.1.1	<i>Consumi di energia primaria complessivi</i>	120
6.1.2	<i>Emissioni inquinanti dell'abitazione</i>	121
6.1.3	<i>Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)</i>	122
6.1.4	<i>Consumi di gas</i>	124
6.1.5	<i>Consumi di energia elettrica</i>	125
6.2	SCENARIO #R4 – RIQUALIFICAZIONE INTEGRALE DELL'ABITAZIONE CON TOTALE ELETTRIFICAZIONE DELLE UTENZE	127
6.2.1	<i>Consumi di energia primaria complessivi</i>	128
6.2.2	<i>Emissioni inquinanti dell'abitazione</i>	129
6.2.3	<i>Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)</i>	130
6.2.4	<i>Consumi di gas</i>	131
6.2.5	<i>Consumi di energia elettrica</i>	131
6.3	DEFINIZIONE DI BENCHMARK PER LE ABITAZIONI RIQUALIFICATE	133
6.3.1	<i>Benchmark per lo Scenario #R3</i>	133
6.3.1	<i>Benchmark per lo Scenario #R4</i>	134
6.4	CONSIDERAZIONI DI RIEPILOGO E CONCLUSIVE	136
7	AGGIUNTA DI 4 ABITAZIONI ARCHETIPO	137
7.1	CARATTERISTICHE DELLE ABITAZIONI ARCHETIPO	137
7.1.1	<i>Archetipo #15</i>	137
7.1.2	<i>Archetipo #16</i>	139
7.1.3	<i>Archetipo #17</i>	142
7.1.4	<i>Archetipo #18</i>	144
7.1.5	<i>Riepilogo delle caratteristiche dei nuovi Archetipi</i>	146

7.2	ANALISI PRELIMINARE DELLE MISURAZIONI EFFETTUATE	147
7.2.1	<i>Archetipo #15</i>	147
7.2.2	<i>Archetipo #16</i>	149
7.2.3	<i>Archetipo #17</i>	151
7.2.4	<i>Archetipo #18</i>	152
7.3	AGGREGAZIONE VIRTUALE DELLE UTENZE	153
8	CONCLUSIONI.....	156
9	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	158
	APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ	159

Sommario

L'obiettivo dell'attività è stato il testing di una piattaforma web per la raccolta dati e la simulazione energetica di utenze residenziali e la popolazione di un archivio dati da utilizzare per la definizione di benchmark di consumo per le utenze residenziali.

L'attività si configura come una prosecuzione delle attività svolte in precedenza dello stesso gruppo di ricerca che hanno portato alla definizione di una procedura semplificata per la valutazione del potenziale di aggregabilità di utenze residenziali e allo studio di un modello di qualificazione e validazione dei consumi elettrici e termici di edifici residenziali. Tale procedura è stata implementata in un foglio di calcolo Excel, che (da altro gruppo di ricerca) è stato inglobato su una piattaforma web nella quale funziona come motore di calcolo lasciando alla piattaforma web il compito della raccolta dei dati di input e della visualizzazione dei risultati di output.

Il database è stato arricchito, con aggiunta di 794 nuovi casi reali (rispetto ai 751 originali), arrivando così a 1545 casi reali totali (+105%). Sono state condotte analisi sul database, per valutare l'incidenza dei singoli servizi sui consumi energetici delle abitazioni e per aggiornare i benchmark di consumo all'interno del foglio di calcolo.

Si è proceduto anche ad effettuare degli aggiornamenti del foglio di calcolo: sono state introdotte delle funzionalità aggiuntive, con l'obiettivo di migliorare il processo di simulazione energetica, di facilitare l'immissione dei dati di input e di adeguare il calcolo della prestazione energetica degli elettrodomestici alle nuove Direttive Comunitarie. La versione aggiornata del foglio di calcolo è stata quindi inserita come motore di calcolo per la piattaforma web. Parallelamente ad altro gruppo di ricerca è stato effettuato il testing della piattaforma web, volto a valutarne il corretto funzionamento.

Utilizzando il database delle abitazioni, sono stati analizzati degli scenari evolutivi per il settore residenziale italiano; in particolare, le simulazioni di scenario sono state condotte per (i) valutare il reale contributo che il settore residenziale italiano può dare ad un'attività di Demand Response; (ii) simulare gli effetti dell'impiego dei climatizzatori presenti nelle abitazioni (se del tipo a pompa di calore) come generatore prioritario per il riscaldamento; (iii) simulare gli effetti sui consumi energetici di una riqualificazione complessiva delle abitazioni mantenendo gli attuali vettori energetici o con totale elettrificazione delle utenze.

In aggiunta, si è proceduto ad attrezzare quattro abitazioni caratterizzate da una forte elettrificazione dei consumi, per le quali è iniziata una campagna di misurazioni, al fine di acquisire una conoscenza di maggior dettaglio relativa a tale tipologia di abitazioni, finora poco diffusa nella realtà italiana.

1 Introduzione

L'obiettivo dell'attività è il testing di una piattaforma web per la raccolta dati e la simulazione energetica di utenze residenziali, nonché la popolazione di un archivio dati da utilizzare per la definizione di benchmark di consumo per le utenze residenziali.

L'attività si configura come una prosecuzione delle attività svolte in precedenza dello stesso gruppo di ricerca [1][2][3][4] (finalizzate allo sviluppo di una procedura semplificata per la valutazione del potenziale di aggregabilità di utenze residenziali, allo studio di un modello di qualificazione e validazione dei consumi elettrici e termici di edifici residenziali) e da altro gruppo di ricerca, il cui risultato atteso è la pubblicazione su piattaforma web di un modulo di raccolta dati per una generica utenza, da inserire in un programma di aggregazione di utenze residenziali.

La collocazione sulla piattaforma web mira ad un popolamento dell'archivio rapido ed efficace, superando la difficoltà finora osservata nella raccolta dati. In particolare, l'obiettivo che si vuole raggiungere attraverso l'ampiamiento dell'archivio è un maggiore diffusione geografica della collocazione delle abitazioni e una più ampia caratterizzazione tipologica. Nelle precedenti annualità di ricerca, infatti, sono state raccolte informazioni su un numero significativo di casi reali (circa 800), riscontrando tuttavia una debole diffusione geografica e una scarsa presenza di abitazioni con un grado di elettrificazione superiore al 50%.

Tale ultima carenza, ampiamente giustificata in termini statistici dalla situazione esistente, rappresenta certamente un punto debole dell'archivio, in un contesto residenziale che si sta sviluppando con una maggiore elettrificazione delle utenze e con un maggior impiego di risorse energetiche rinnovabili (pompe di calore, fotovoltaico).

Per questo motivo, si è cercato di aggiungere all'archivio abitazioni molto elettrificate, dotate di pompe di calore per il riscaldamento e per la preparazione dell'acqua calda e dotate di impianti fotovoltaici per la produzione di energia elettrica.

In aggiunta, si è proceduto ad attrezzare quattro abitazioni caratterizzate da una forte elettrificazione dei consumi, al fine di acquisire una conoscenza di maggior dettaglio relativa a tale tipologia di abitazioni, finora poco diffusa nella realtà italiana.

Nei capitoli che seguono sono illustrate le attività svolte:

- nel capitolo 2 sono descritte le caratteristiche del database ampliato e sono illustrate le analisi effettuate con l'obiettivo di arrivare alla definizione di benchmark di consumo da utilizzare come strumento previsionale e per la predisposizione di suggerimenti rivolti all'utente compilatore;
- nel capitolo 3 sono descritti gli aggiornamenti apportati al foglio di calcolo volti a introdurre funzionalità aggiuntive, a migliorare il processo di simulazione energetica e ad adeguare il calcolo della prestazione energetica degli elettrodomestici alle nuove Direttive Comunitarie; è anche descritta il funzionamento della piattaforma web sviluppata per la simulazione energetica basata sul foglio di calcolo;
- nei capitoli 4, 5 e 6, utilizzando il database disponibile al momento, sono analizzati degli scenari evolutivi per il settore residenziale italiano; in particolare:
 - nel capitolo 4 a partire da una procedura per l'aggregazione virtuale delle utenze
 - i. è definita una possibile strategia di flessibilità per il sistema elettrico italiano;
 - ii. è stata effettuata una valutazione del reale potenziale di flessibilità che le abitazioni possono offrire, in funzione di vincoli imposti;
 - iii. è stata definita una metodologia per individuare il dimensionamento ottimale di un impianto fotovoltaico con accumulo, finalizzata alla riduzione dei picchi di domanda elettrica;
 - nel capitolo 5 sono mostrati i risultati di simulazioni effettuate sul database finalizzate a valutare gli effetti sui consumi energetici dell'utilizzo delle pompe di calore come generatore

- prioritario di riscaldamento, considerando sia le dotazioni attuali (Scenario #R1), sia l'introduzione di un ulteriore climatizzatore in tutte le abitazioni (Scenario #R2);
- nel capitolo 6 sono mostrati i risultati di simulazioni effettuate sul database finalizzate a valutare gli effetti sui consumi energetici di interventi di riqualificazione complessiva delle residenze (con gli incentivi del "Superbonus 110%") mantenendo gli attuali vettori energetici (Scenario #R3) e con totale elettrificazione delle utenze (Scenario #R4);
 - nel capitolo 7 sono descritte le caratteristiche delle quattro abitazioni che sono state strumentate e le analisi preliminari effettuate relativamente a tali abitazioni.

2 Attività di ampliamento e analisi sul database dei casi reali

E' proseguita l'attività di ampliamento del database con altri casi reali, utilizzando il questionario su foglio Excel e chiedendo ancora, come nelle annualità precedenti, la collaborazione degli studenti della Facoltà di Architettura di Sapienza Università di Roma.

Sono stati raccolti ulteriori 794 questionari (rispetto ai 751 originali), raggiungendo complessivamente 1545 casi reali e arrivando così a raddoppiare il numero di casi reali presenti.

Per la raccolta dati è stata utilizzata l'ultima versione del questionario, che prevede un numero ridotto di input rispetto alle versioni precedenti [4], con eliminazione di alcuni input ritenuti non necessari e con congelamento di altri input ritenuti marginali, in quanto relativi a servizi poco influenti sui consumi complessivi.

2.1 Caratteristiche generali delle abitazioni

La dimensione media delle abitazioni considerate è pari a 128,2 m², oscillando tra un valore minimo di 22,3 m² ad un valore massimo di 660,9 m² (primo quartile = 79,2 m²; mediana = 108,0 m²; terzo quartile 151,8 m²).

Il numero medio di occupanti è pari a 3,2, oscillando tra un valore minimo di 1 e un valore massimo di 9. Maggiormente ricorrenti sono le abitazioni che hanno 4 occupanti (36,5%), 3 occupanti (23,8%) e 2 occupanti (22,2%); meno ricorrenti abitazioni con un numero inferiore o superiore di occupanti.

I grafici di Figura 2.1 riportano in dettaglio superfici e occupanti per le abitazioni considerate.

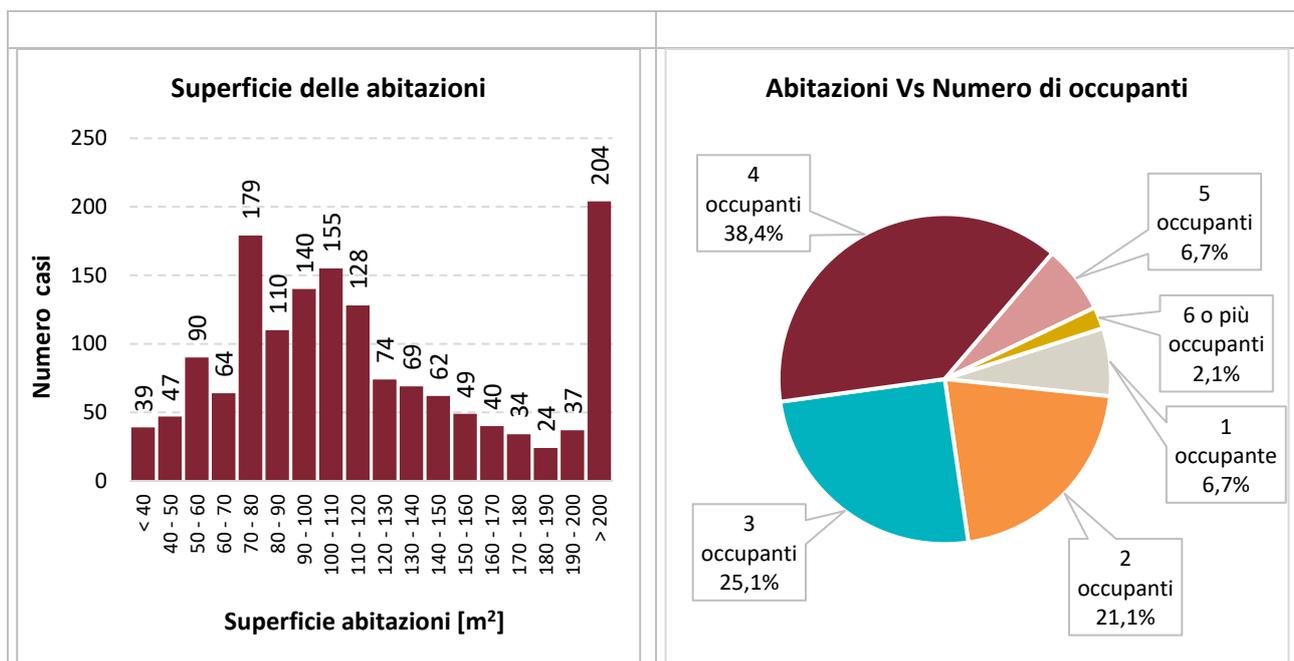


Figura 2.1 – Superficie delle abitazioni considerate e occupanti.

Con riferimento alla superficie pro-capite, è stata effettuata anche un'analisi statistica per un maggior dettaglio sulla distribuzione del campione.

Tale analisi è riportata in Figura 2.2 utilizzando la classica rappresentazione a "scatole e baffi", dove viene rappresentato un rettangolo verticale ("la scatola") diviso in due parti, da cui escono due segmenti ("i baffi"). Il rettangolo è delimitato dal primo e dal terzo quartile e diviso al suo interno dalla mediana. I segmenti sono delimitati dal minimo e dal massimo dei valori. All'interno delle scatole è anche indicato il valore medio.

Dall'esame del grafico si evidenzia come la superficie pro-capite diminuisca al crescere degli occupanti, fino ad arrivare a 30,6 m² a persona nelle abitazioni con 5 occupanti o più.

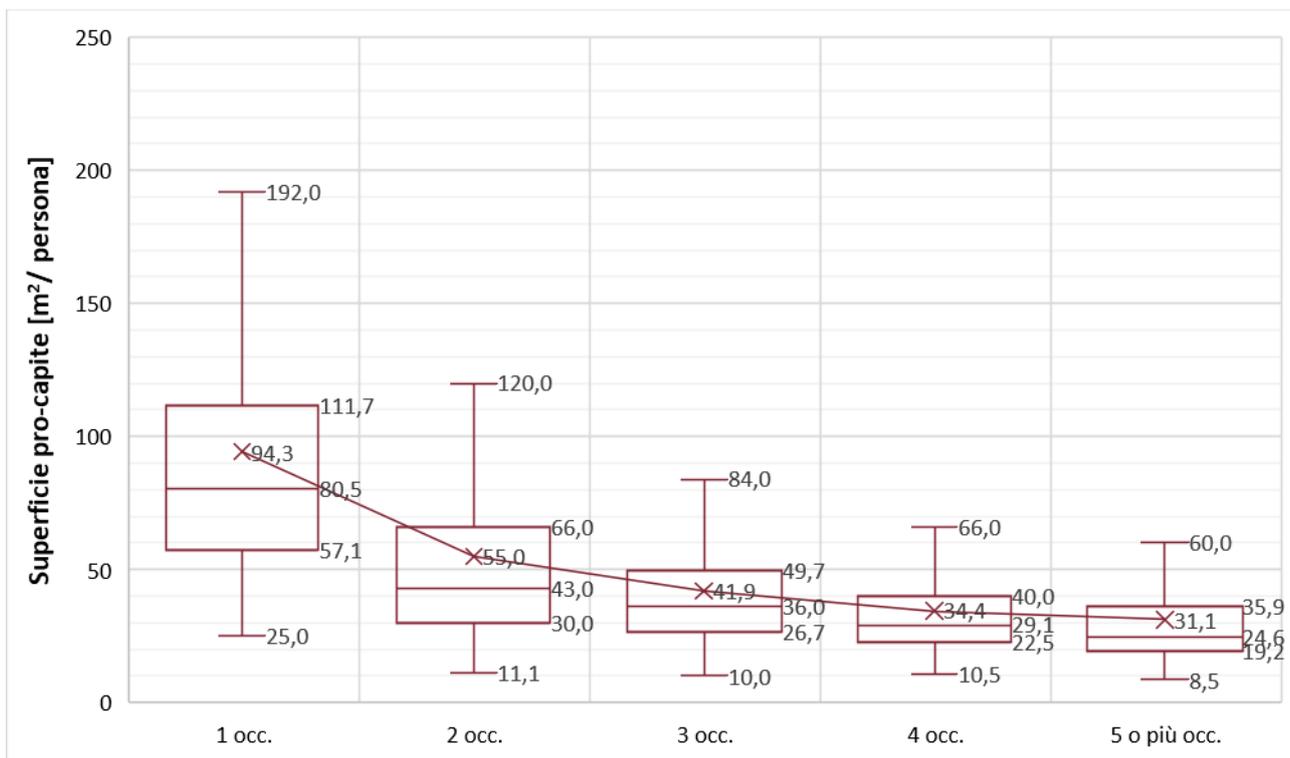


Figura 2.2 –Superficie pro-capite in funzione del numero di occupanti.

I grafici di Figura 2.3 riportano un dettaglio dei gradi giorno e della zona climatica per le abitazioni considerate; molte delle abitazioni considerate sono collocate a Roma e pertanto la zona climatica maggiormente rappresentata risulta ancora essere la Zona D.

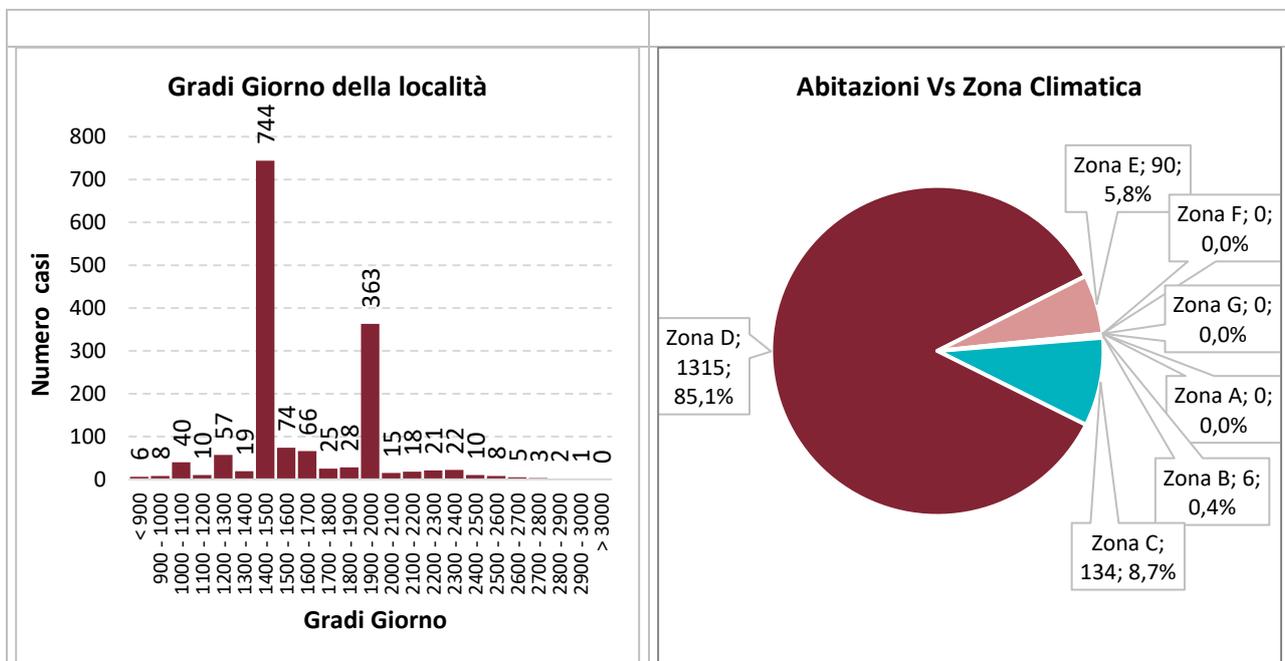


Figura 2.3 – Gradi giorno delle località e zona climatica per le abitazioni considerate (1545 abitazioni).

Tuttavia, il database è stato allargato con altre abitazioni della stessa zona climatica, ma con una distribuzione più ampia in termini di gradi giorno, come si può evincere dal confronto tra il database nella configurazione attuale (1545 abitazioni, Figura 2.3) e il database precedente (751 abitazioni, Figura 2.4). In particolare, si osserva da un lato una forte presenza (438 su 1545, 48,1%) di abitazioni collocate in località con Gradi Giorno

compresi tra 1400 e 1500 (in larga parte Roma), e dall'altro la presenza di abitazioni (363 su 1545, 23,5%) di abitazioni collocate in località con Gradi Giorno compresi tra 1900 e 2000.

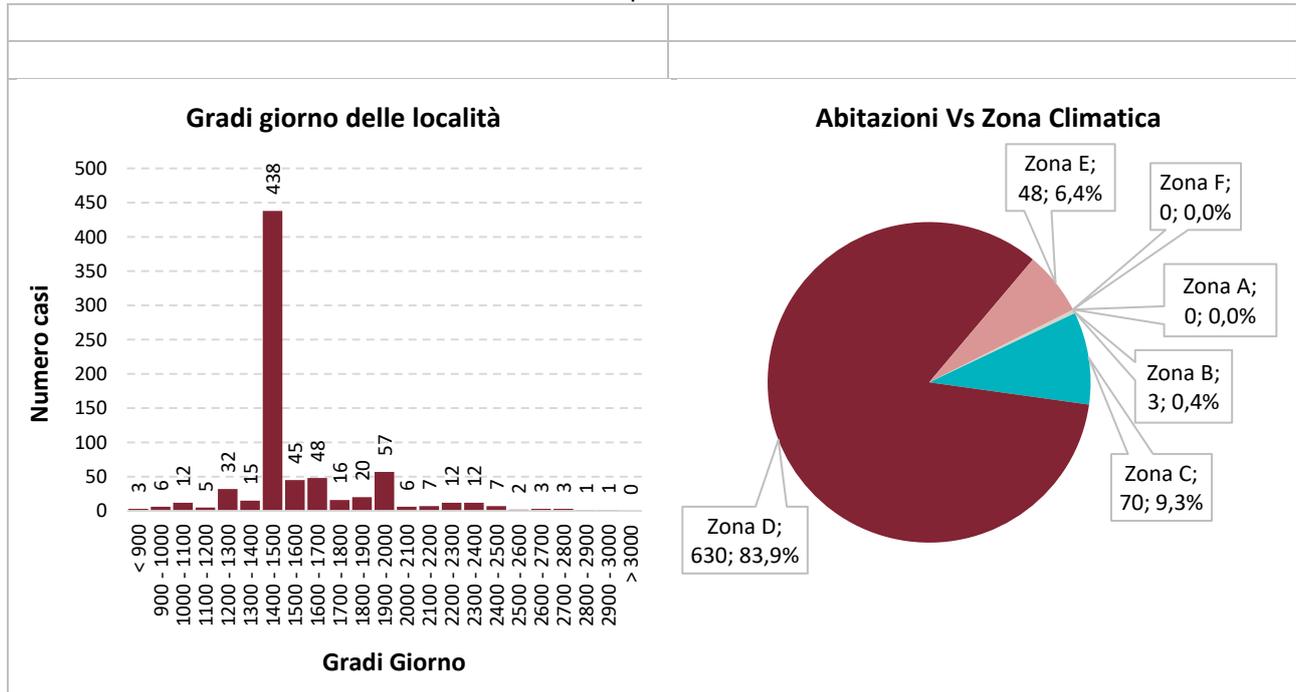


Figura 2.4 – Gradi giorno delle località e zona climatica per le abitazioni considerate (751 abitazioni).

In Figura 2.5 è riportato il periodo di costruzione delle abitazioni considerate; in Tabella 2.1 è riportato il numero di abitazioni che hanno subito ristrutturazioni, suddiviso per periodo di costruzione e per tipologia di intervento; l'intervento di riqualificazione più frequente è la sostituzione delle finestre, effettuata in 575 abitazioni (37,2% del totale).

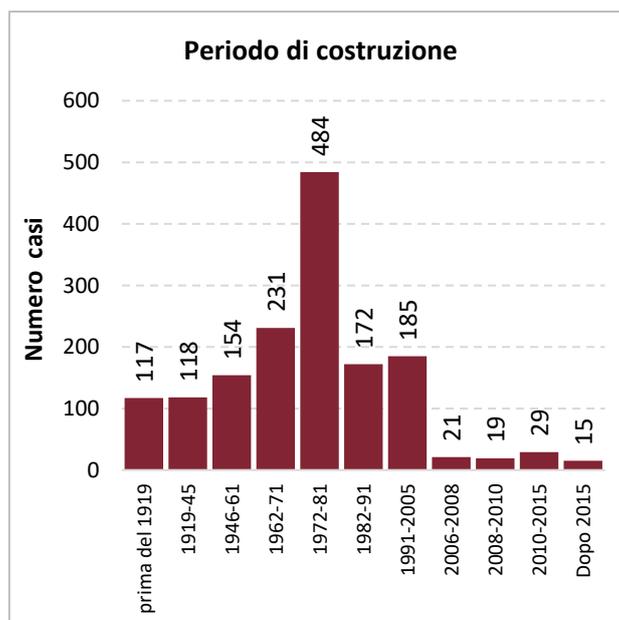


Figura 2.5 – Periodo di costruzione per le abitazioni considerate.

Tabella 2.1 – Interventi di riqualificazione effettuati nelle abitazioni.

Anno di costruzione dell'edificio	Isolamento Pareti	Isolamento Coperture	Isolamento Pavimenti	Sostituzione Finestre
Prima del 1919	4 (3,4%)	17 (14,5%)	4 (3,4%)	50 (42,7%)
1919-45	7 (5,9%)	11 (9,3%)	8 (6,8%)	56 (47,5%)
1946-61	16 (10,4%)	17 (11%)	5 (3,2%)	100 (64,9%)
1962-71	29 (12,6%)	27 (11,7%)	9 (3,9%)	109 (47,2%)
1972-81	41 (8,5%)	46 (9,5%)	18 (3,7%)	150 (31%)
1982-91	25 (14,5%)	19 (11%)	14 (8,1%)	61 (35,5%)
1991-2005	37 (20%)	30 (16,2%)	20 (10,8%)	35 (18,9%)
2006-2008	2 (9,5%)	4 (19%)	2 (9,5%)	2 (9,5%)
2008-2010	2 (10,5%)	1 (5,3%)	0 (0%)	2 (10,5%)
2010-2015	12 (41,4%)	11 (37,9%)	11 (37,9%)	8 (27,6%)
after 2015	3 (20%)	3 (20%)	2 (13,3%)	2 (13,3%)
TOTALE	178 (11,5%)	186 (12%)	93 (6%)	575 (37,2%)

2.2 Dotazioni delle abitazioni e usi

In questo paragrafo è riportato un quadro riepilogativo delle dotazioni delle abitazioni; tale paragrafo ricalca quanto riportato nei report precedenti aggiornandone i contenuti.

2.2.1 Riscaldamento abitazione

Nel questionario proposto agli utenti, sono stati considerati solo impianti di riscaldamento alimentati a gas o a energia elettrica, avendo escluso, in questa prima versione del foglio di calcolo, gli impianti alimentati a biomassa, in ragione della natura “in isola” di questi impianti e del basso potenziale di aggregabilità da essi rappresentato.

Relativamente all'impianto di riscaldamento è prevista la scelta tra impianti centralizzati e autonomi, con generatori di calore di tipo diverso (caldaia a gas naturale tradizionale, caldaia a gas naturale a condensazione; pompa di calore elettrica); per le pompe di calore elettriche è possibile indicare la classe energetica in riscaldamento (Figura 2.6).

3.1 IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	
Tipo di impianto di riscaldamento	Centralizzato
Tipo di generatore di calore	Caldaia a gas naturale a condensazione
Classe energetica media in riscaldamento	
Terminali in ambiente	Radiatori (termosifoni)
Modalità di regolazione	Termostato manuale

Impianto autonomo a gas con radiatori e termostato

Impianto centralizz. a gas con radiatori

Figura 2.6 – Input per impianto di riscaldamento.

Sulla base dei questionari raccolti, in tutte le abitazioni considerate è presente l'impianto di riscaldamento, con una netta prevalenza degli impianti autonomi (70,1%), rispetto agli impianti centralizzati (29,9%) e degli impianti alimentati a gas (98,4%), rispetto agli impianti alimentati elettricamente (1,5%), così come illustrato in Figura 2.7.

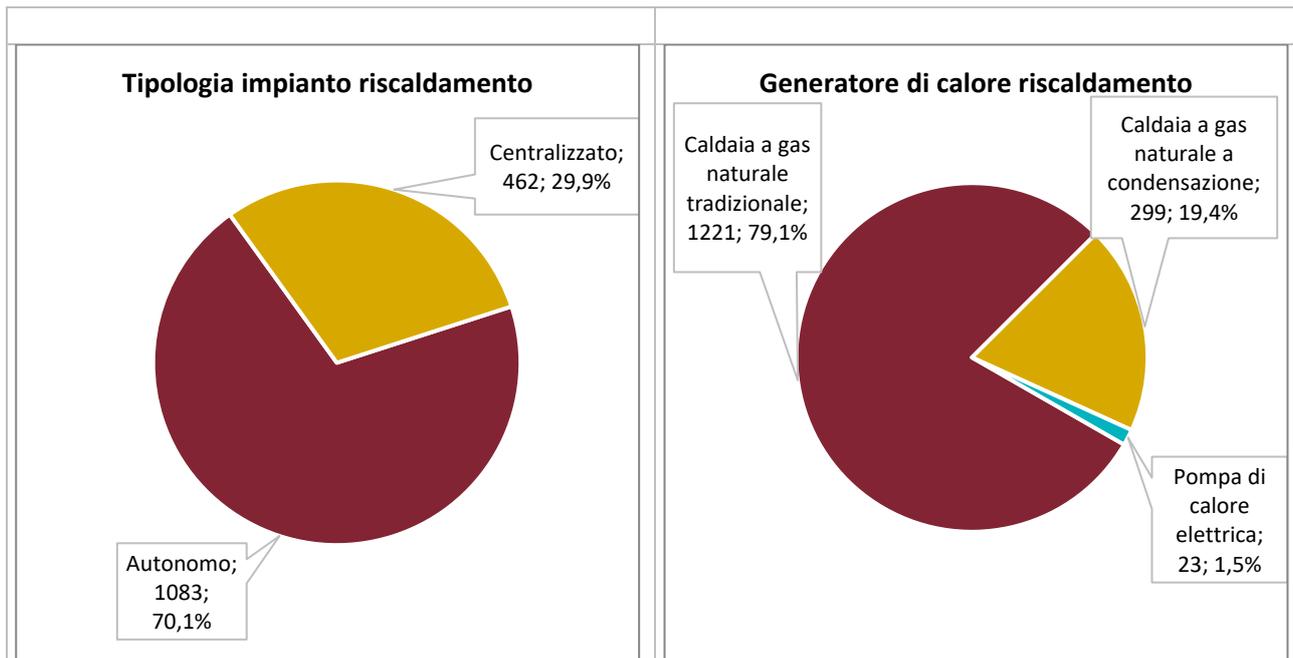


Figura 2.7 – Impianti di riscaldamento nelle abitazioni.

2.2.2 Raffrescamento abitazione

Nel questionario proposto agli utenti, sono state assimilate a “impianto di raffrescamento” tutte le apparecchiature impiegate ai fini del comfort termoigrometrico nella stagione estiva.

Per i condizionatori elettrici è necessario indicare la classe energetica in raffrescamento e il numero di stanze climatizzate; per gli altri apparecchi è richiesto di indicare la quantità e le ore di uso giornaliero (Figura 2.8).

3.2 IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO

Tipo di impianto di raffrescamento	Condizionatore elettrico		<input type="radio"/> Nessun condizionatore <input checked="" type="radio"/> Condizionatori in tutte le stanze <input type="radio"/> Nessun apparecchio
Classe energetica media in raffrescamento	A+		
Numero di stanze climatizzate	2	su un totale di 7 stanze	
ALTRI APPARECCHI			
	QUANTITA'	ORE USO GIORNALIERO	
Ventilatore			
Deumidificatore portatile			

Figura 2.8 – Input per impianto di raffrescamento.

Tra le abitazioni considerate, solo 1272 (82,3%) sono dotate di apparecchiature utili al raffrescamento nella stagione estiva; le restanti 273 (17,7%) ne sono prive.

In particolare, in 677 abitazioni (43,8%) è presente almeno un condizionatore elettrico fisso, in 484 (31,3%) abitazioni è presente almeno un ventilatore e in 111 (7,2%) abitazioni è presente almeno un deumidificatore portatile.

Ove presenti i condizionatori elettrici fissi sono al servizio di un numero limitato di stanze; il numero medio di stanze climatizzate è pari a 2,7. Solo il 20,8% delle abitazioni ha un numero di stanze climatizzate superiore a 3 (Figura 2.9).

Per quanto riguarda la classe energetica, larga parte dei condizionatori fissi (555/677; 82,0%) ha una classe energetica pari alla A o migliore (Figura 2.9b).

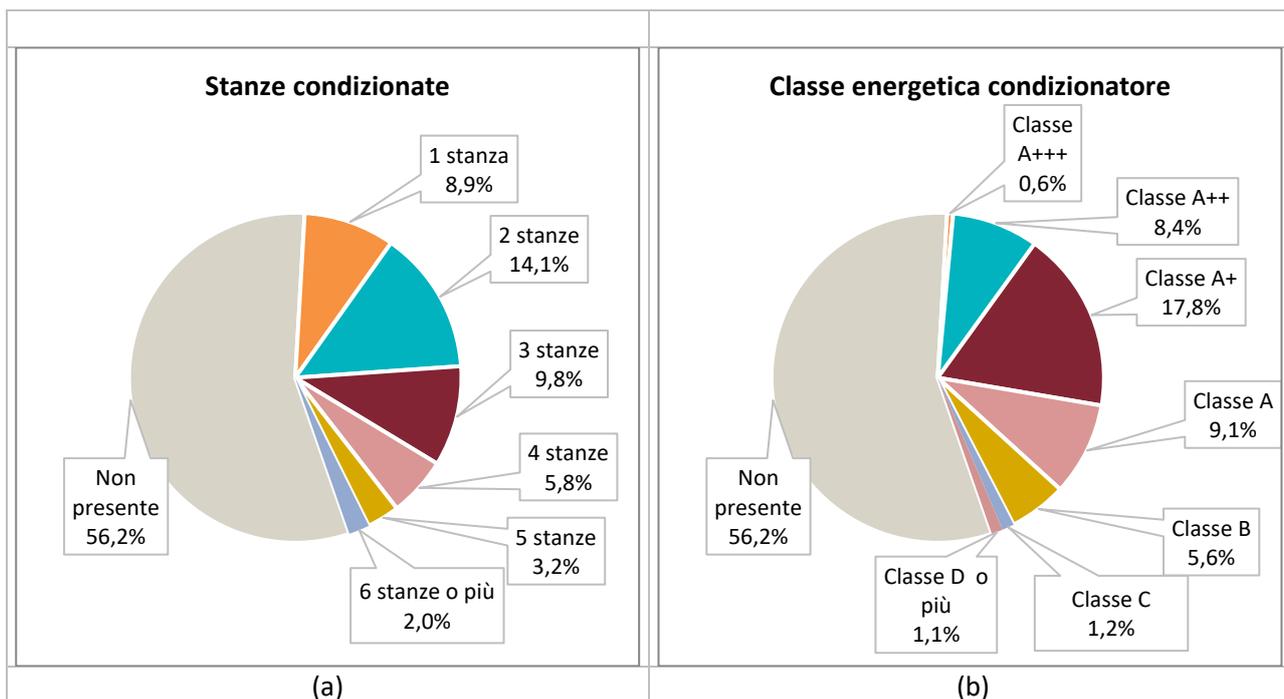


Figura 2.9 – (a) Abitazioni e numero di stanze condizionate; (b) Classe energetica condizionatori.

2.2.3 Preparazione acqua calda sanitaria

Relativamente agli impianti per la preparazione dell’acqua calda sanitaria, è possibile scegliere tra diverse tipologie (caldaia tradizionale, caldaia a condensazione, scaldabagno a pompa di calore, scaldabagno elettrico a resistenza) e indicare la eventuale presenza di un impianto solare termico (a circolazione naturale o forzata, con pannelli piani o sottovuoto) con le relative caratteristiche dimensionali (numero di pannelli) e di collocazione (inclinazione e orientamento) (Figura 2.10).

3.3 IMPIANTO DI PREPARAZIONE DELL’ACQUA CALDA SANITARIA	
Tipo di impianto di preparazione dell’acqua calda sanitaria	Caldaia a condensazione
3.4 IMPIANTO SOLARE TERMICO (per acqua calda)	
Tipo di impianto	Nessuno
Numero di pannelli solari termici	
Inclinazione (tilt)	
Orientamento rispetto al sud (azimut)	

Figura 2.10 – Impianto di preparazione acqua calda sanitaria.

Sulla base dei questionari raccolti, in tutte le abitazioni considerate è presente un impianto per la preparazione di acqua calda sanitaria, con una netta prevalenza delle caldaie istantanee (75,3%), rispetto alle altre tipologie, quali caldaia a condensazione con accumulo integrato (8,0%), scaldabagni elettrici (12,9%) e scaldabagni a pompa di calore (3,8%) (Figura 2.11a). Complessivamente, solo il 16,7% degli impianti di preparazione dell’acqua calda sanitaria è alimentato elettricamente.

Solo il 7,8% delle abitazioni considerate è dotato di un impianto solare termico per la preparazione di acqua calda sanitaria (Figura 2.11b).

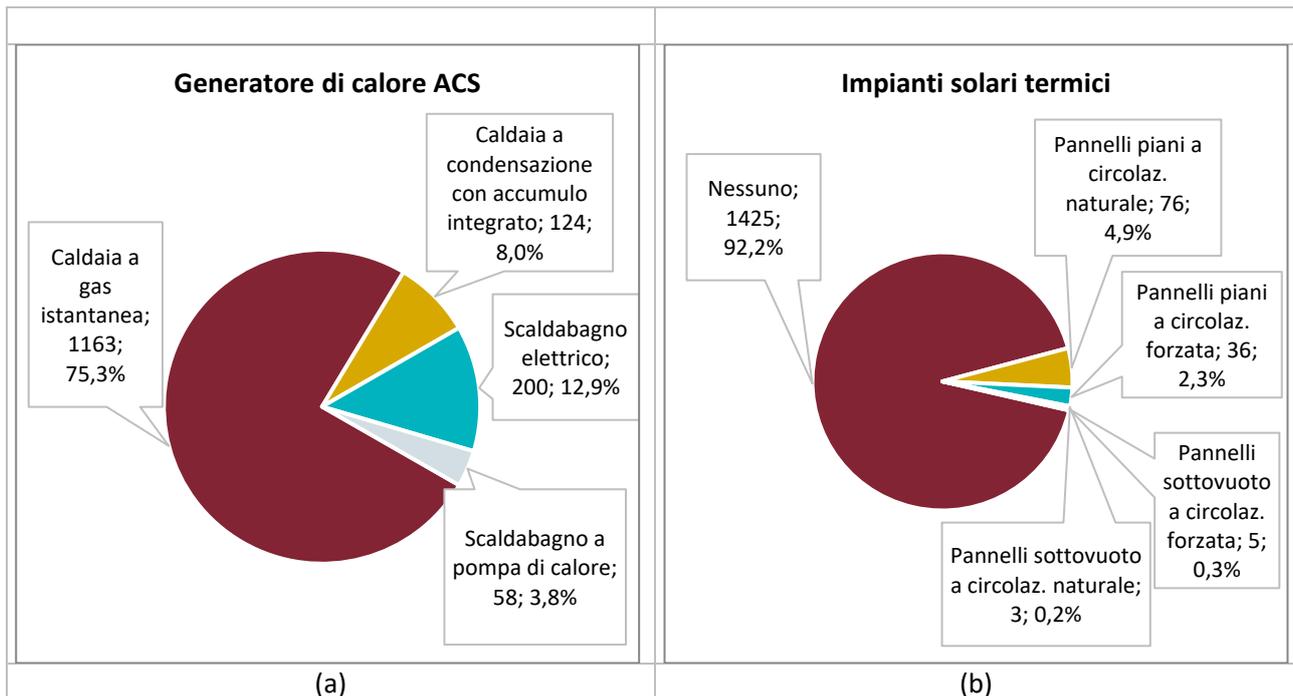


Figura 2.11 – Impianti di preparazione ACS; (a) generatore di calore (b) impianti solari termici.

2.2.4 Impianti fotovoltaici

Relativamente agli impianti fotovoltaici per la produzione di energia elettrica è possibile indicare l'eventuale presenza dell'impianto con le relative caratteristiche dimensionali (potenza dell'impianto fotovoltaico) e di collocazione (inclinazione e orientamento) (Figura 2.12).

Nella versione attuale del questionario, è stata aggiunta la possibilità di inserire e simulare gli effetti di una batteria di accumulo.

3.5 IMPIANTO SOLARE FOTOVOLTAICO (per energia elettrica)			
Potenza dell'impianto fotovoltaico	1,00	kWp	Potenza consigliata: 1,6 kWp
Inclinazione (tilt)	30	°	Stima max potenza installabile: 4,0 kWp
Orientamento rispetto al sud (azimut)	0	°	
Capacità della batteria di accumulo	5,90	kWh	Valore consigliato: 4,2 kWh

Figura 2.12 – Input per impianto solare fotovoltaico.

Solo il 6,1% delle abitazioni considerate è dotato di un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica. Larga parte degli impianti presenti (69/94; 73,4%) ha una potenza inferiore a 3 kWp (Figura 2.13).

Nessuno degli impianti fotovoltaici è dotato di batteria di accumulo.

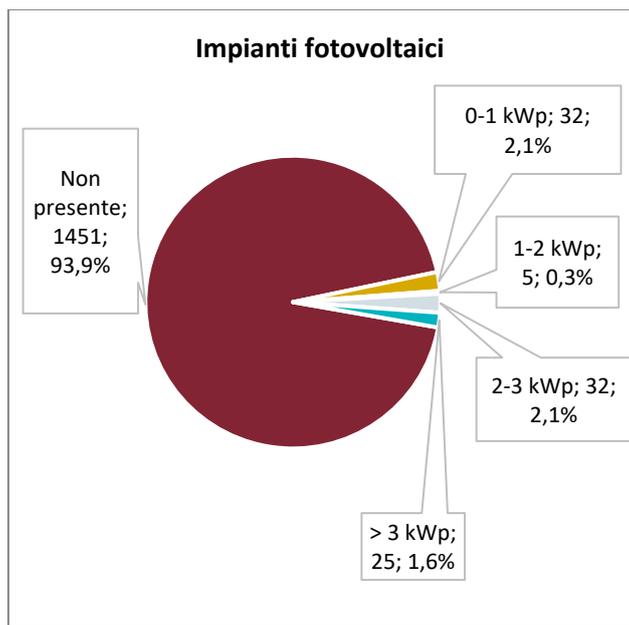


Figura 2.13 – Impianti fotovoltaici.

2.2.5 Cucina

Le informazioni relative agli usi energetici di cucina sono quelle riportate in Figura 2.14.

Per il piano cottura è possibile scegliere tra tre diverse alternative (a gas, elettrico, elettrico a induzione), indicando i minuti di uso giornaliero; per il forno a microonde è necessario indicare i minuti di uso giornaliero; per il forno è possibile scegliere tra due alternative (elettrico, a gas).

In questa versione del questionario, sono stati eliminati gli input relativi alle apparecchiature marginali della cucina. Il consumo elettrico di tali apparecchiature è stato posto pari a 64 kWh/anno.

4.1 CUCINA		
	Elettrico a induzione	MINUTI USO GIORN.
Piano cottura	A gas	120
Forno a microonde		30
Forno	Elettrico	120

Uso giornaliero
ALTO

Uso giornaliero
MEDIO

Uso giornaliero
BASSO

Figura 2.14 – Cucina.

Sulla base dei questionari raccolti, in tutte le abitazioni considerate sono presenti il piano cottura ed il forno; per quanto riguarda il piano cottura (Figura 2.15a), si ha una netta prevalenza dei piani di cottura a gas (93,9%), rispetto ai piani di cottura elettrici (1,4%) o elettrici a induzione (4,7%); per quanto riguarda il forno (Figura 2.15b), si ha una netta prevalenza dei forni elettrici (85,9%) rispetto ai forni a gas (14,0%).

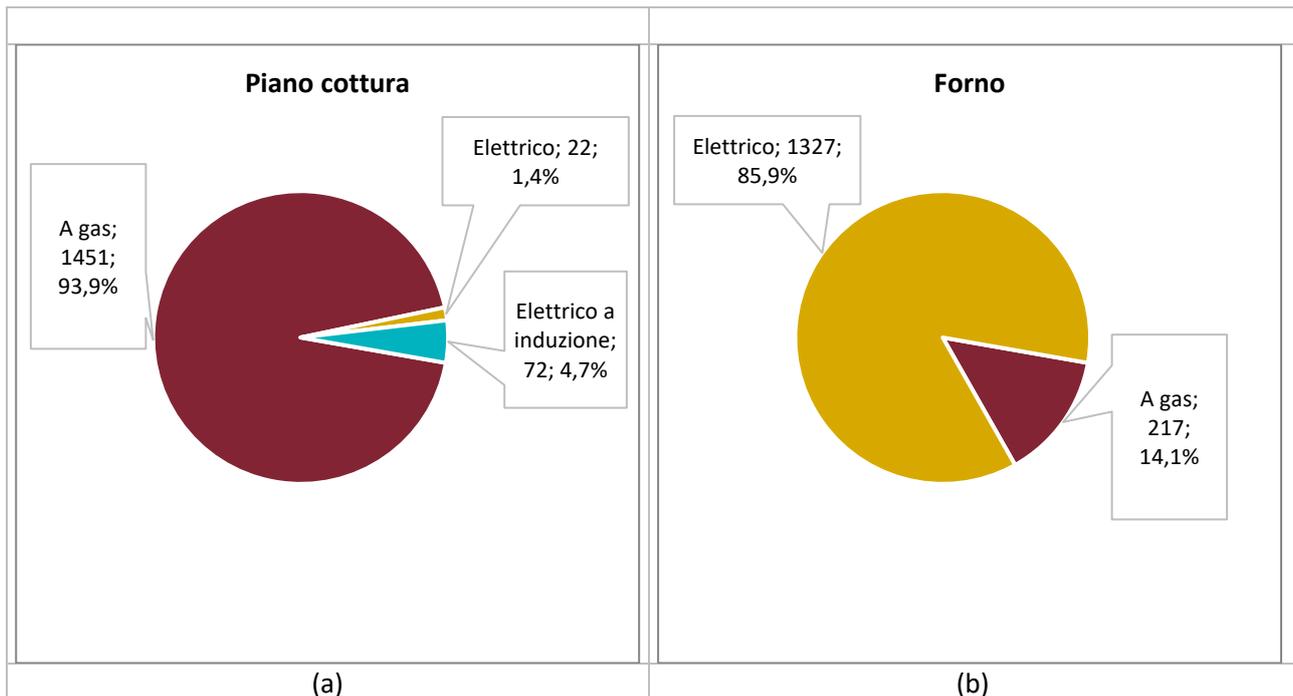


Figura 2.15 – Dotazioni cucina (a) piano cottura; (b) forno.

2.2.6 Refrigerazione

Le apparecchiature utilizzate per la refrigerazione e per la congelazione possono essere selezionate attraverso un menu a tendina (frigorifero a temperatura moderata o cantina; frigorifero con scomparto a 1 stella; frigorifero con scomparto a 2 stelle; frigorifero con scomparto a 3 stelle; frigo-congelatore, congelatore verticale; congelatore a pozzetto). Per le apparecchiature presenti è necessario indicare il volume utile e la classe energetica (Figura 2.16).

In questa versione del questionario, è stata eliminata una riga di input, lasciando la possibilità di inserire fino ad un massimo di tre apparecchiature per la refrigerazione.

4.2 REFRIGERAZIONE		
TIPO DI FRIGORIFERO	VOLUME [litri]	CLASSE ENERGETICA
Frigo-congelatore	270	A+
Congelatore verticale	200	A+
Nessuno		

Figura 2.16 – Refrigerazione, congelazione.

In tutte le abitazioni considerate è presente almeno un'apparecchiatura per la refrigerazione; in 193 abitazioni (12,5%) sono presenti due apparecchiature; in 28 abitazioni (1,8%) ne sono presenti tre.

Mediamente nelle abitazioni sono presenti 1,14 apparecchiature per la refrigerazione.

La classe energetica delle apparecchiature è in generale buona (Figura 2.17); circa la metà (47,2%) delle apparecchiature ha una classe energetica uguale o migliore della classe A+; delle restanti il 24,2% è comunque in classe A.

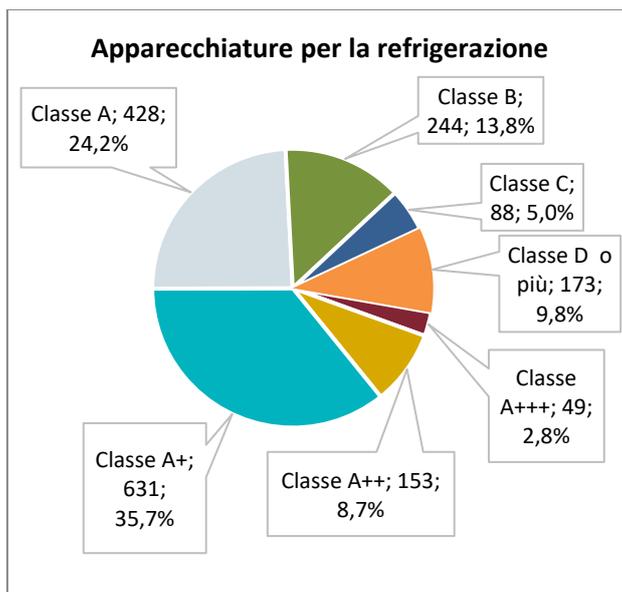


Figura 2.17 – Classe energetica delle apparecchiature per la refrigerazione.

2.2.7 Lavaggio, pulizia stiratura

Attraverso la sezione 4.3 del questionario vengono raccolte le informazioni relative alle attività di lavaggio pulizia e stiratura, così come illustrato in Figura 2.18.

Per i grandi elettrodomestici utilizzati per il lavaggio della biancheria e delle stoviglie (lavatrice, asciugatrice, lavastoviglie, lavasciuga) il foglio di calcolo prevede l'indicazione della capacità di carico, del numero di cicli settimanali e della classe energetica. Per aspirapolvere, scopa elettrica o ferro da stiro è richiesto unicamente di indicare i minuti di uso giornaliero.

4.3 LAVAGGIO, PULIZIA E STIRATURA			
	CAPACITA' DI CARICO	CICLI SETTIMANALI	CLASSE ENERGETICA
Lavatrice [kg]	7	5,0	A+
Asciugatrice [kg]			
Lavastoviglie [coperti]			
Lavasciuga [kg]			
4,00			
	MINUTI USO GIORN.		
Aspirapolvere	5		
Scopa elettrica			
Ferro da stiro senza caldaia			
Ferro da stiro con caldaia			

Utilizzo medio in base al numero di persone

Altri apparecchi non inclusi nella lista possono essere inseriti in 4.8

Figura 2.18 –Lavaggio biancheria, asciugatura biancheria, lavaggio stoviglie.

Sulla base dei questionari raccolti (Tabella 2.2), in larghissima parte delle abitazioni considerate è presente la lavatrice (1492 abitazioni; 96,6% del totale), con 53 sole eccezioni (49 in cui è presente una lavasciuga; 4 abitazioni in cui è assente). La lavastoviglie è presente solo nel 66,1% delle abitazioni; la presenza dell'asciugatrice è limitata al 4,6% delle abitazioni.

Tabella 2.2 – Presenza e capacità dei grandi elettrodomestici.

	Presenza (% sul totale)	Capacità di carico (media)
Lavatrice	96,6%	7,1 kg
Lavasciuga	3,2%	6,1 kg
Asciugatrice	4,6%	7,8 kg
Lavastoviglie	66,1%	10,4 coperti

La classe energetica delle apparecchiature di lavaggio è in generale buona (Figura 2.19, Figura 2.20):

- 89,8% delle lavatrici è in classe A o migliore;
- 100,0% delle lavasciuga è in classe A o migliore;
- 80,7% delle lavastoviglie è in classe A o migliore;
- 84,5% delle asciugatrici è in classe A o migliore.

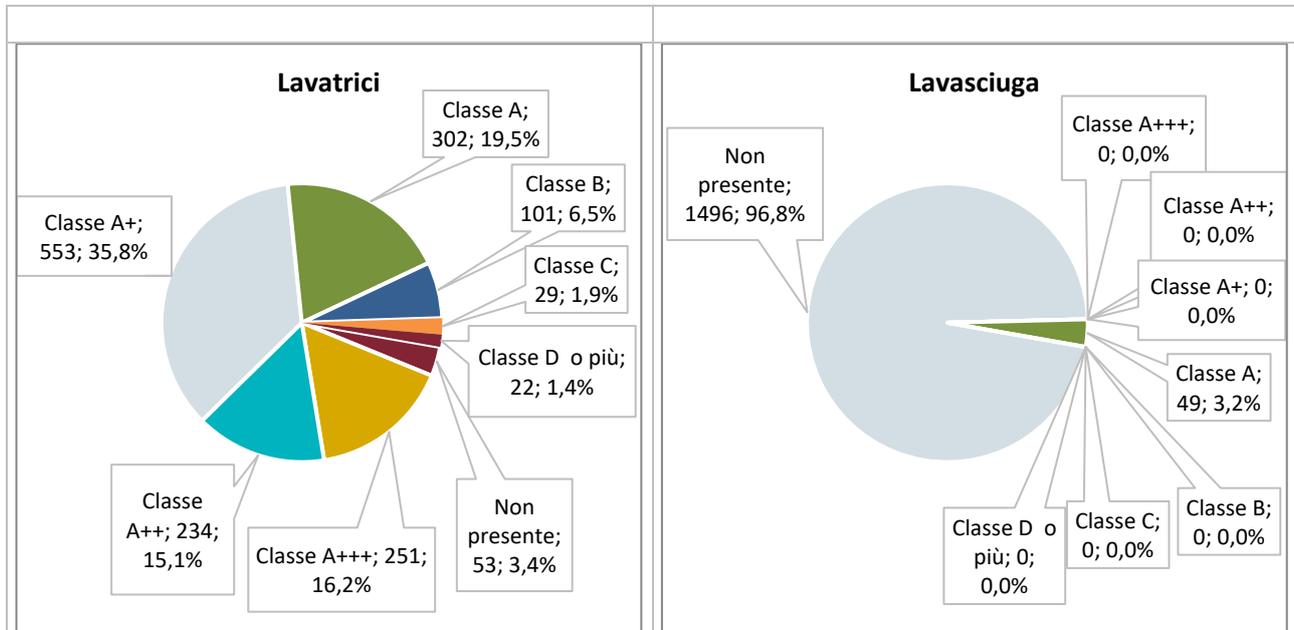


Figura 2.19 – Presenza e classe energetica di lavatrici e lavasciuga.

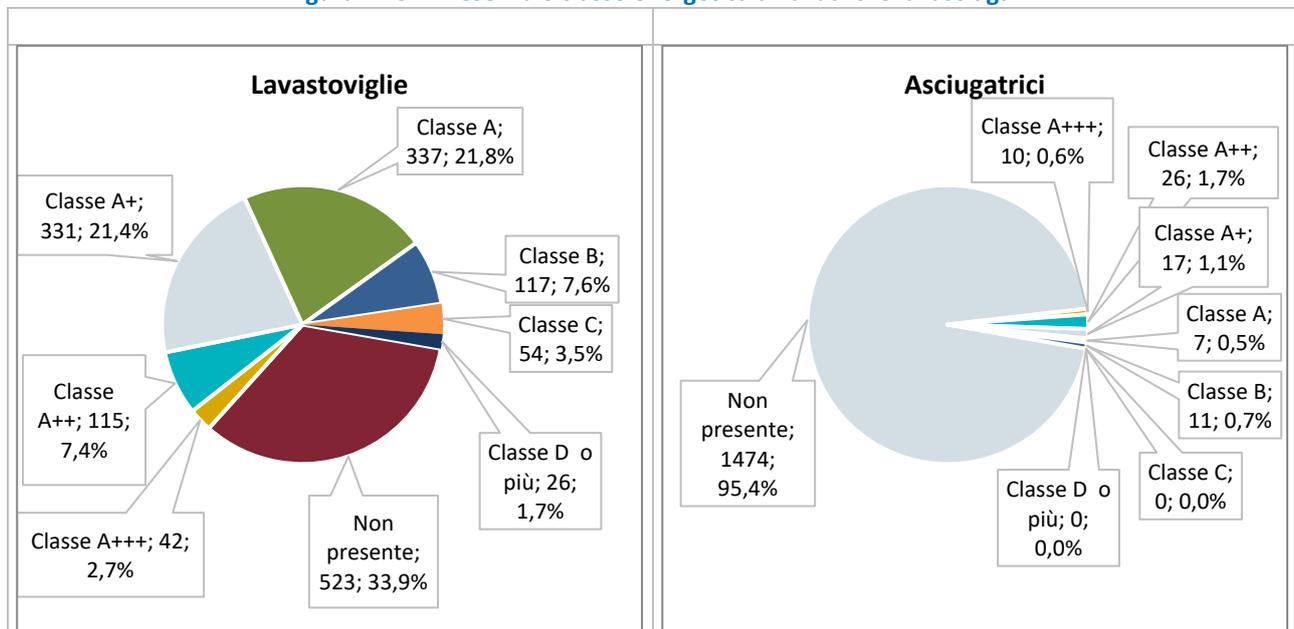


Figura 2.20 – Presenza e classe energetica di asciugatrici e lavastoviglie.

In 1430 delle abitazioni considerate (92,6%) vengono utilizzati aspirapolvere o scope elettriche; l'utilizzo medio giornaliero è pari a 9,1 minuti.

In 1328 delle abitazioni considerate (86,0%) vengono utilizzati ferri da stiro con o senza caldaia; l'utilizzo medio giornaliero è pari a 10,4 minuti.

2.2.8 Illuminazione

Le informazioni relative all’illuminazione degli ambienti sono quelle riportate in Figura 2.21 e prevedono una semplice numerazione delle lampade, con suddivisione tra le diverse tipologie (a incandescenza; alogene; fluorescenti; a led).



Figura 2.21 – Illuminazione ambienti.

Ovviamente, in tutte le abitazioni considerate è presente un impianto di illuminazione.

Larga parte delle lampade presenti nelle abitazioni considerate ha una elevata efficienza luminosa (Figura 2.22); in particolare il 74,5% delle lampade presenti sono del tipo fluorescenti compatte oppure a LED.

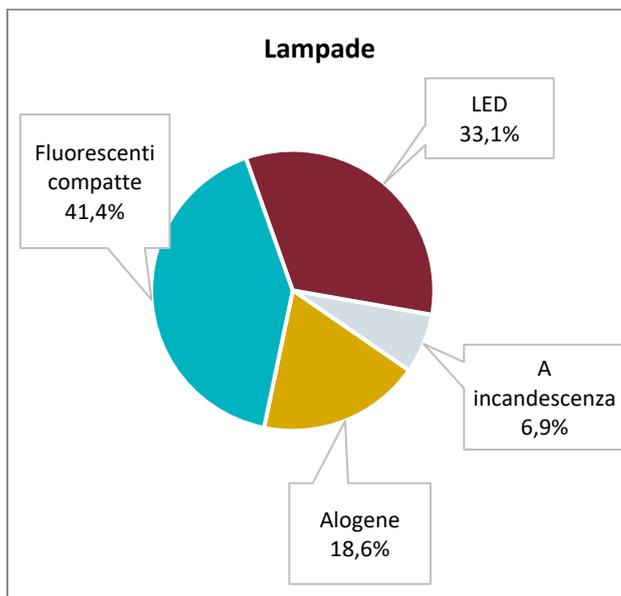


Figura 2.22 – Tipologia di lampade presenti.

2.2.9 Postazioni Audio-Video

In questa versione del questionario, sono stati eliminati gli input relativi alle postazioni audio-video; il consumo elettrico di tali apparecchiature è stato posto pari a 19 kWh/anno.

2.2.10 Computer - Internet

Le informazioni relative alle postazioni PC sono quelle riportate in Figura 2.23. La caratterizzazione energetica viene effettuata con riferimento a valori medi di potenza elettrica e in base all’uso effettuato.

In questa versione del questionario, sono stati eliminati gli input relativi al modem per l’accesso ad internet e alle stampanti; il consumo elettrico di tali apparecchiature è stato posto pari a 86 kWh/anno.

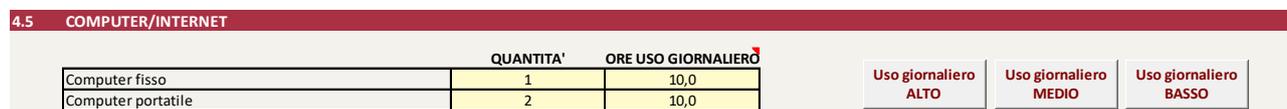


Figura 2.23 – Postazioni PC.

Sulla base dei questionari raccolti, sono presenti postazioni PC in 1343 delle abitazioni considerate (86,9%), mentre non è presente nessuna apparecchiatura in 202 abitazioni (13,1%). Mediamente si hanno 0,29 computer fissi ad abitazione e 0,82 computer portatili ad abitazione. L'utilizzo medio di computer è pari a circa 11,8 ore giornaliere.

2.2.11 Cura della persona

Le informazioni relative alle apparecchiature per la cura della persona sono quelle riportate in Figura 2.24. Si tratta di apparecchiature per le quali la caratterizzazione energetica viene effettuata con riferimento a valori medi di potenza elettrica e in base all'uso effettuato.

4.7 CURA DELLA PERSONA	
	MINUTI USO GIORN. ▼
Asciugacapelli	40
Piastra per capelli	

Altri apparecchi non inclusi nella lista possono essere inseriti in 4.8

Figura 2.24 – Apparecchiature per cura della persona.

Sulla base dei questionari raccolti, sono utilizzate apparecchiature per la cura della persona in 1517 delle abitazioni considerate (98,2%), mentre non è utilizzata nessuna apparecchiatura in 28 abitazioni (1,8%).

L'asciugacapelli è utilizzato in 1517 abitazioni (98,2%); l'utilizzo medio è di 16,7 minuti al giorno.

La piastra per capelli è utilizzata in 679 abitazioni (43,9%); l'utilizzo medio è pari a 5,9 minuti al giorno.

2.2.12 Altri apparecchi

L'ultima parte del questionario di raccolta dati presenta una sezione ad input libero, per inserire altri apparecchi non menzionati altrove (Figura 2.25); anche in questo caso la caratterizzazione energetica viene effettuata con riferimento a valori medi di potenza elettrica e in base all'uso effettuato.

In questa versione del questionario, è stata eliminata una riga di input, lasciando la possibilità di inserire fino ad un massimo di tre apparecchiature.

4.7 ALTRI APPARECCHI			
	QUANTITA'	POTENZA MEDIA [W]	MINUTI USO GIORN. ▼
Apparecchio 1			
Apparecchio 2			
Apparecchio 3			

Nessun apparecchio

Figura 2.25 – Altri apparecchi.

Sulla base dei questionari raccolti, questa sezione del questionario è stata compilata solo per 246 abitazioni (15,9%); per 75 abitazioni (4,9%) sono stati inseriti due apparecchi; per 4 abitazioni (0,3%) sono stati inseriti tre apparecchi.

2.3 Valutazione dell'incidenza dei singoli servizi sui consumi complessivi

Ai fini di una caratterizzazione dei consumi delle abitazioni, è stata effettuata una ripartizione per servizi dei consumi di energia primaria; ricalcando la struttura del foglio di calcolo, sono stati considerati:

1. riscaldamento dell'abitazione;
2. raffrescamento dell'abitazione;
3. preparazione dell'acqua calda sanitaria;
4. cucina (preparazione dei cibi);
5. refrigerazione e congelazione alimenti;
6. lavaggio (lavaggio biancheria, asciugatura biancheria, lavaggio stoviglie);
7. pulizia casa e stiratura;
8. illuminazione;
9. postazioni audio-video (intrattenimento);
10. postazioni PC;
11. cura della persona;
12. altri apparecchi (non espressamente elencati).

Il grafico di Figura 2.26 riporta la ripartizione facendo riferimento al valore medio; la maggior parte dei consumi energetici delle abitazioni è connessa al riscaldamento (43,5%); seguono in termini di importanza la preparazione di acqua calda sanitaria (12,2%) e la cucina (13,6%). Tutti gli altri usi energetici hanno un'incidenza inferiore al 7%.

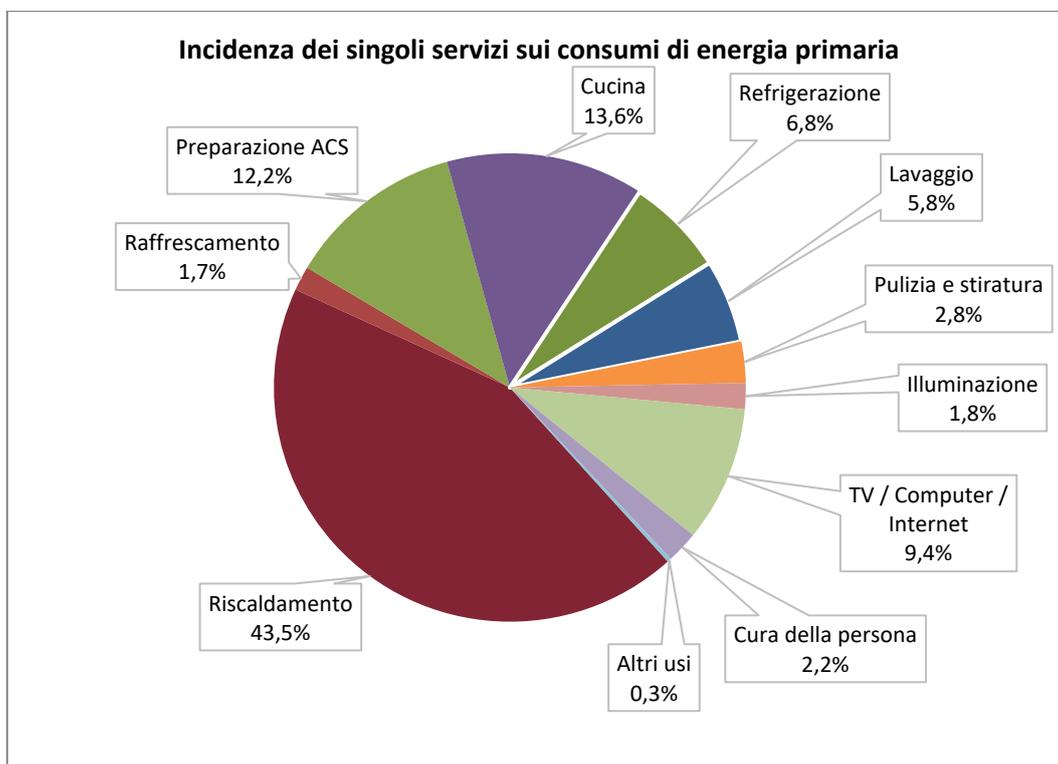


Figura 2.26 – Incidenza dei singoli servizi sui consumi di energia primaria.

2.4 Definizione di benchmark di consumo

Con l'intenzione di arrivare alla definizione di benchmark di consumo per le residenze italiane sono state eseguite delle analisi sul database volte a valutare eventuali correlazioni tra i dati di output della simulazione (consumi di gas, consumi di energia elettrica, consumi di energia primaria, elettrificazione dei consumi, carichi accumulabili, carichi differibili, emissioni inquinanti, uso di Fonti Energetiche Rinnovabili) e variabili di input significative (superficie dell'abitazione, numero di occupanti, gradi giorno); le stesse analisi sono state effettuate relativamente ai servizi singoli universalmente presenti nelle abitazioni (Riscaldamento, Preparazione ACS e Cucina) e per i quali l'incidenza sui consumi di energia primaria complessivi supera il 10%. I benchmark ottenuti sono stati poi implementati nel foglio di calcolo, aggiornando quelli già presenti.

Le suddette analisi statistiche sono state effettuate utilizzando lo strumento di analisi dei dati di Excel.

Le analisi sono state condotte raggruppando le abitazioni in funzione del numero di occupanti e per classi dimensionali, avendo individuato 5 classi dimensionali (abitazione piccola <50 m²; abitazione medio-piccola 50-85 m²; abitazione media 85-115 m²; abitazione medio-grande 115-145 m²; abitazione grande >145 m²).

I risultati delle correlazioni individuate saranno mostrati di volta in volta utilizzando la seguente nomenclatura:

- CG sono i consumi di gas espressi in Sm³/anno;
- CE sono i consumi di energia elettrica espressi in kWh/anno;
- CP sono i consumi di energia primaria espressi in kWh/anno;
- CP_{RISC} sono i consumi di energia primaria per riscaldamento espressi in kWh/anno;
- CP_{ACS} sono i consumi di energia primaria per preparazione ACS espressi in kWh/anno;
- CP_K sono i consumi di energia primaria per la cucina espressi in kWh/anno;
- Ef indica l'elettrificazione dei consumi in percentuale, come rapporto in termini di energia primaria tra i consumi elettrici e i consumi totali dell'abitazione;
- ACC sono i carichi elettrici accumulabili, espressi in kWh/anno;
- DIFF sono i carichi elettrici differibili, espressi in kWh/anno;
- Elnq sono le emissioni inquinanti in termini di anidride carbonica equivalente espresse kg/anno;
- FER% è la quota dei consumi di energia primaria coperta da Fonti Energetiche Rinnovabili (FER), espressa in percentuale;
- S è la superficie utile dell'abitazione espressa in m²;
- N è il numero massimo di occupanti dell'abitazione;
- GG sono i gradi giorno della località.

A tal proposito conviene ricordare la classificazione effettuata degli usi energetici per il settore residenziale, in funzione della natura del generico carico (Figura 2.27): (i) carico accumulabile; il consumo di energia può essere disaccoppiato dal servizio reso in virtù di un accumulo che può essere di tipo diverso (accumulo elettrochimico, inerzia termica, ecc.); (ii) carico differibile; il consumo di energia può essere spostato nel tempo senza influire sul servizio reso; un carico spostabile può comportare anche un processo non interrompibile (come un ciclo di lavanderia) e richiedere quindi una pianificazione; (iii) carico interrompibile; il consumo di energia non può essere spostato senza influire sul servizio reso, ma il servizio può essere interrotto anche immediatamente; (iv) carico di base (non interrompibile); quando l'utenza ha bisogno di potenza istantanea e non può essere interrotta o spostata nel tempo; (v) autogenerazione; la preparazione di energia elettrica effettuata da parte del consumatore, che, in certi casi può essere utilizzata come alimentazione di back-up.

Autogenerazione	Mix di carico			
	Carichi non accumulabili			Carichi accumulabili
	Carichi non differibili		Carichi differibili	
	Carichi di base	Carichi interrompibili		
Fotovoltaico, micro-CHP, micro-eolico, imp. a biomassa, ecc.	Antifurto, TV, automazione, illuminazione, ecc.	PC, TV, illuminazione, strumenti multifunzione, ecc.	Lavatrici, asciugatrici, lavastoviglie, aspirapolvere, ecc.	Produzione ACS, accumuli elettrochimici, riscaldamento, raffrescamento, veicoli elettrici, ecc.

Figura 2.27 – Mix di carico generico.

2.4.1 Consumi di gas

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di gas, considerando il consumo pro-capite in funzione del numero di occupanti dell'abitazione e il consumo per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

I consumi di gas pro-capite sono mediamente pari a 533,9 Sm³/persona; il primo quartile ha consumi di gas pro-capite inferiori a 211,1 Sm³/persona; il secondo quartile inferiori a 343,1 Sm³/persona; il terzo quartile inferiori a 603,9 Sm³/persona.

Al crescere del numero di occupanti dell'abitazione (Figura 2.28), i consumi pro-capite di gas diminuiscono, passando da 1429,3 Sm³/persona (1 occupante) a 276,9 Sm³/persona (5 o più occupanti).

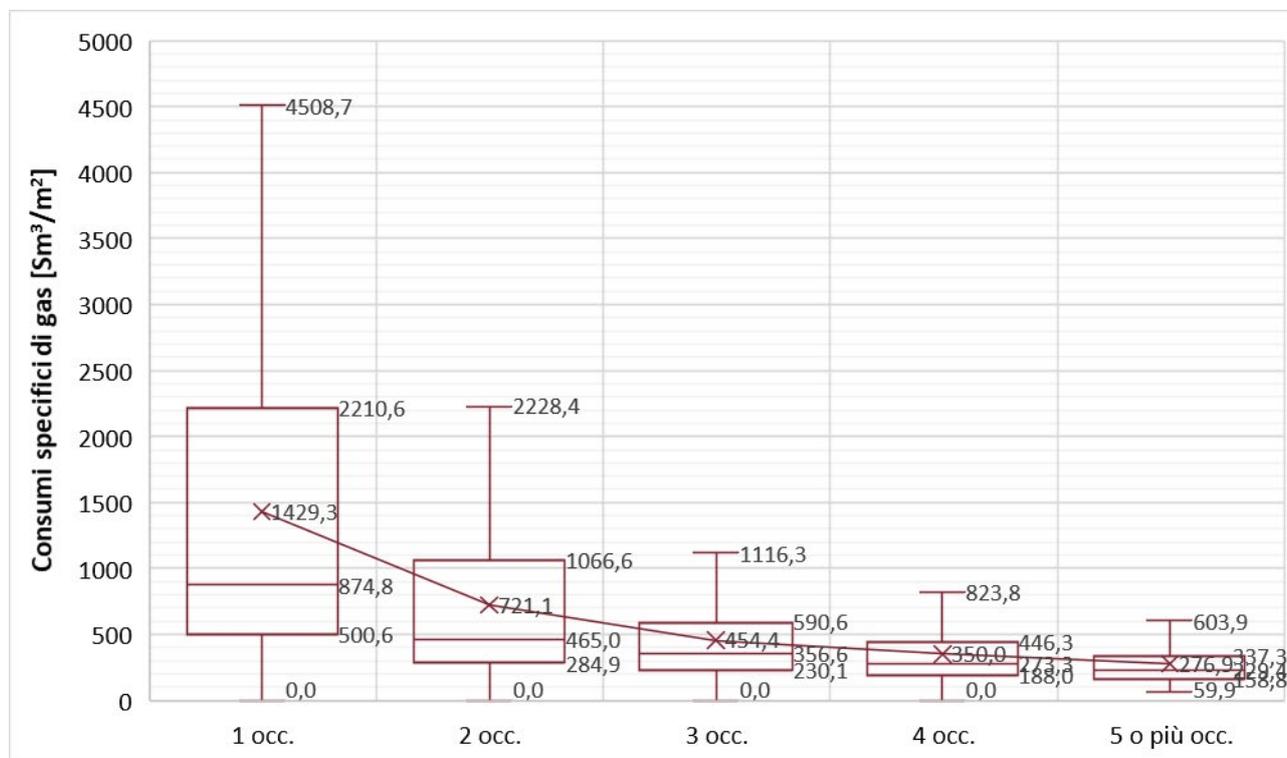


Figura 2.28 – Consumi di gas pro-capite.

I consumi di gas per unità di superficie sono mediamente pari a $9,9 \text{ Sm}^3/\text{m}^2$; il primo quartile ha consumi di gas per unità di superficie inferiori a $6,2 \text{ Sm}^3/\text{m}^2$; il secondo quartile inferiori a $9,2 \text{ Sm}^3/\text{m}^2$; il terzo quartile inferiori a $12,7 \text{ Sm}^3/\text{m}^2$. I consumi di gas per unità di superficie diminuiscono al crescere della dimensione dell'abitazione (Figura 2.29); in particolare, per piccole abitazioni i consumi specifici solo pari mediamente a $12,0 \text{ Sm}^3/\text{m}^2$, mentre per le grandi abitazioni i consumi specifici sono pari mediamente a $10,1 \text{ Sm}^3/\text{m}^2$.

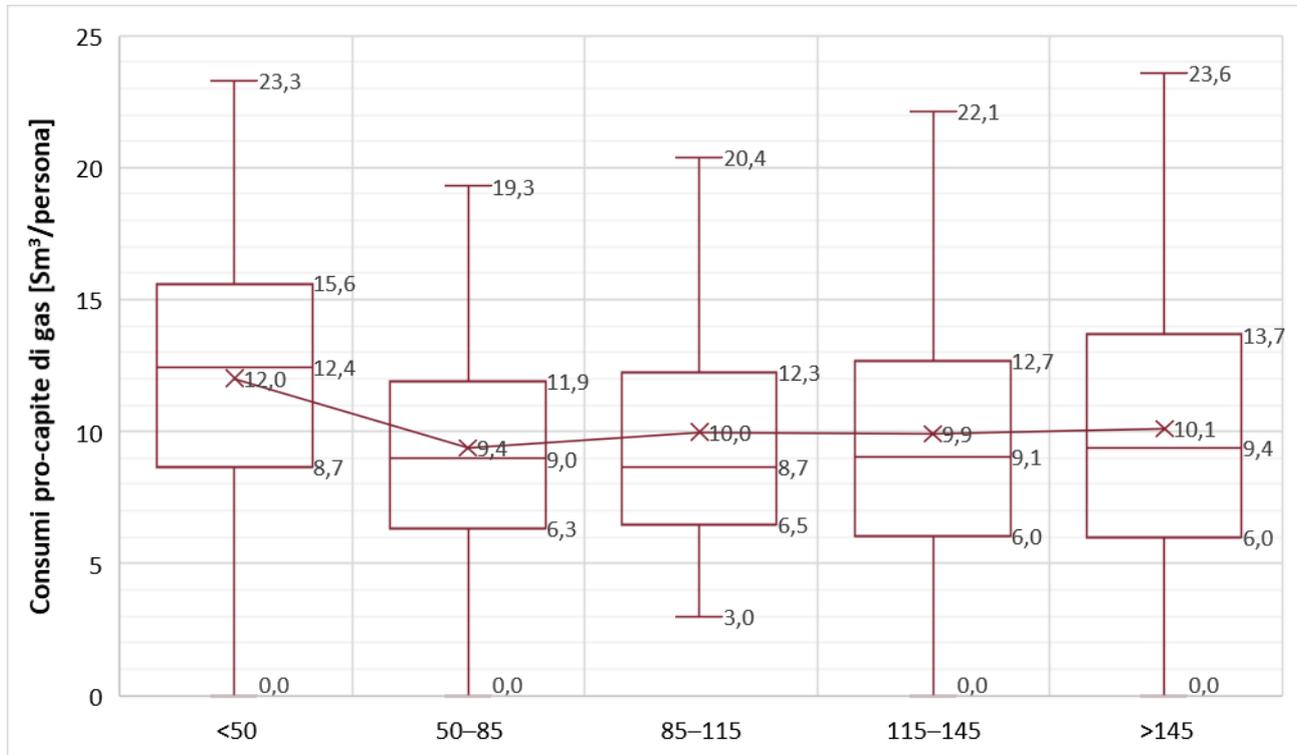


Figura 2.29 – Consumi di gas per unità di superficie.

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per i consumi di gas dell'abitazione, con il significato dei simboli sopra definito.

$$CG = -1469,5 + 6,6916 \cdot S - 60,715 \cdot N + 1,3054 \cdot GG \quad (2.1)$$

$$CG = 632,73 + 8,1827 \cdot S - 125,05 \cdot N \quad (2.2)$$

Nella (2.1) i consumi di gas sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una buona correlazione ($R \text{ multiplo} = 0,77$); nella (2.2) i consumi di gas sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una buona correlazione ($R \text{ multiplo} = 0,66$) sebbene minore della precedente.

2.4.2 Consumi di energia elettrica

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di energia elettrica, considerando il consumo pro-capite in funzione del numero di occupanti dell'abitazione e il consumo per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

I consumi di energia elettrica pro-capite sono mediamente pari a $996,6 \text{ kWh/persona}$; il primo quartile ha consumi di energia elettrica pro-capite inferiori a $695,3 \text{ kWh/persona}$; il secondo quartile inferiori a $880,4 \text{ kWh/persona}$; il terzo quartile inferiori a $1.175,5 \text{ kWh/persona}$.

Al crescere del numero di occupanti dell’abitazione (Figura 2.30), i consumi pro-capite di energia elettrica diminuiscono, passando da 1820,2 kWh/persona (1 occupante) a 702,6 kWh/persona (5 o più occupanti).

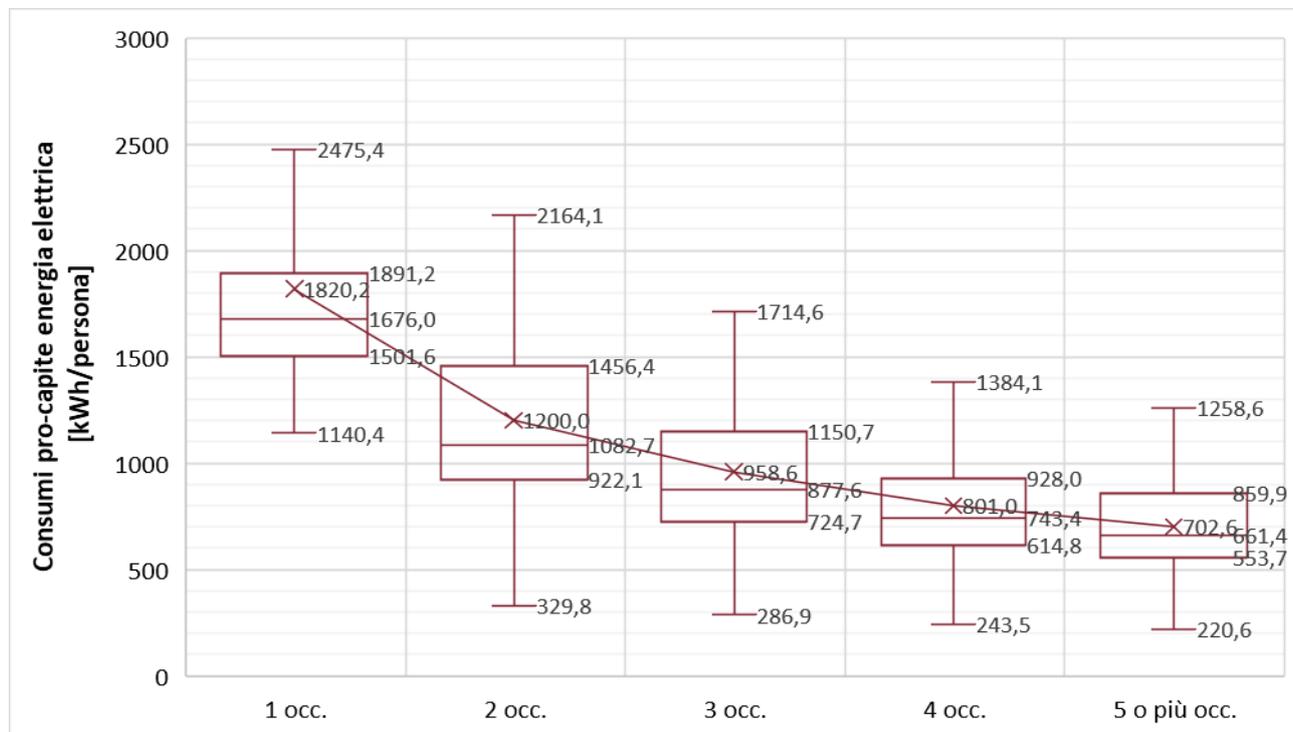


Figura 2.30 – Consumi di energia elettrica pro-capite.

I consumi di energia elettrica per unità di superficie sono mediamente pari a 25,0 kWh/m²; il primo quartile ha consumi di energia elettrica per unità di superficie inferiori a 15,2 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 22,7 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 31,8 kWh/m².

I consumi di energia elettrica per unità di superficie diminuiscono al crescere della dimensione dell'abitazione (Figura 2.31); in particolare, per piccole abitazioni i consumi specifici solo pari mediamente a 58,6 kWh/m², mentre per le grandi abitazioni i consumi specifici sono pari mediamente a 14,5 kWh/m².

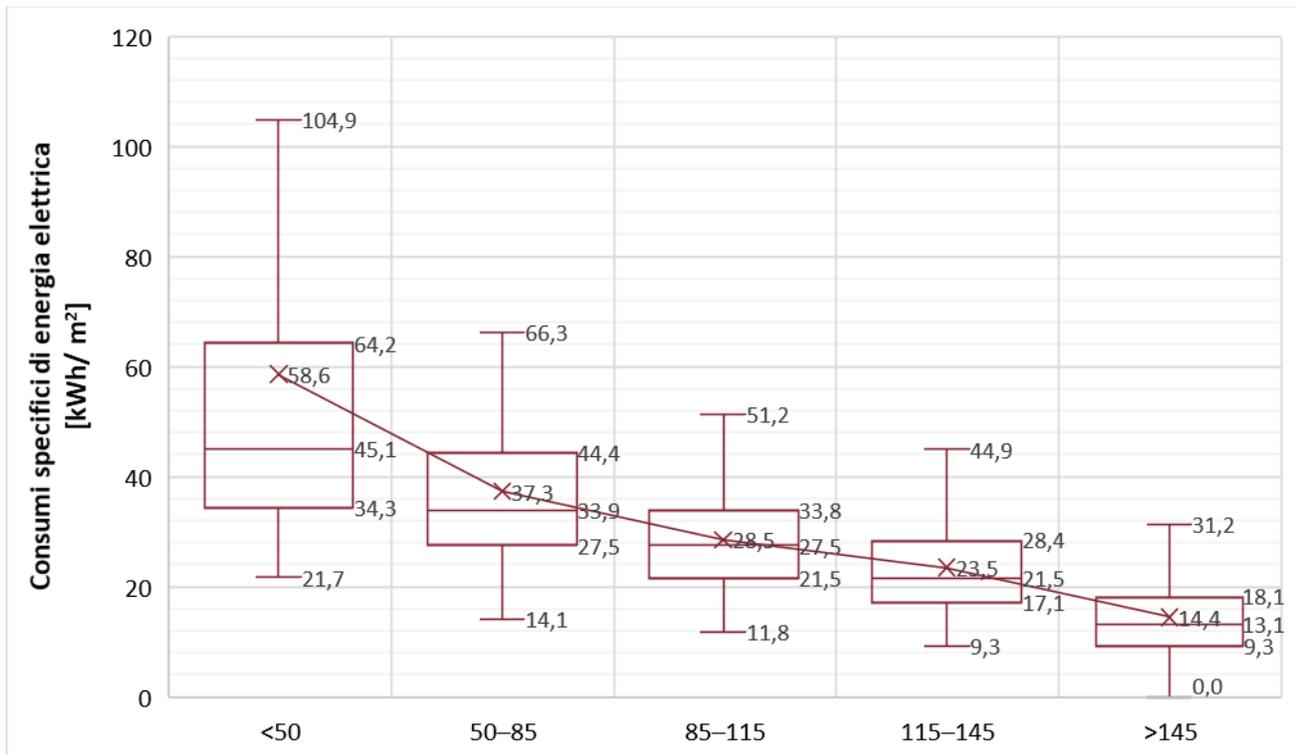


Figura 2.31 – Consumi di energia elettrica per unità di superficie.

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per i consumi di energia elettrica delle abitazioni, con il significato dei simboli sopra definito.

$$CE = 2075,8 + 1,7503 \cdot S + 384,15 \cdot N - 0,41364 \cdot GG \quad (2.3)$$

$$CE = 1409,7 + 1,2778 \cdot S + 404,54 \cdot N \quad (2.4)$$

Nella (2.3) i consumi di energia elettrica sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una discreta correlazione (R multiplo= 0,48); nella (2.4) i consumi di energia elettrica sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una discreta correlazione (R multiplo= 0,46) in linea con la precedente.

2.4.3 Consumi di energia primaria

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di energia primaria, considerando il consumo pro-capite in funzione del numero di occupanti dell'abitazione e il consumo per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

I consumi di energia primaria pro-capite sono mediamente pari a 7624,3 kWh/persona; il primo quartile ha consumi di energia primaria pro-capite inferiori a 4183,4 kWh/persona; il secondo quartile inferiori a 5710,1 kWh/persona; il terzo quartile inferiori a 8488,4 kWh/persona.

Al crescere del numero di occupanti dell'abitazione (Figura 2.28), i consumi pro-capite di energia primaria diminuiscono, passando da 18472,1 kWh/persona (1 occupante) a 4387,3 kWh/persona (5 o più occupanti).

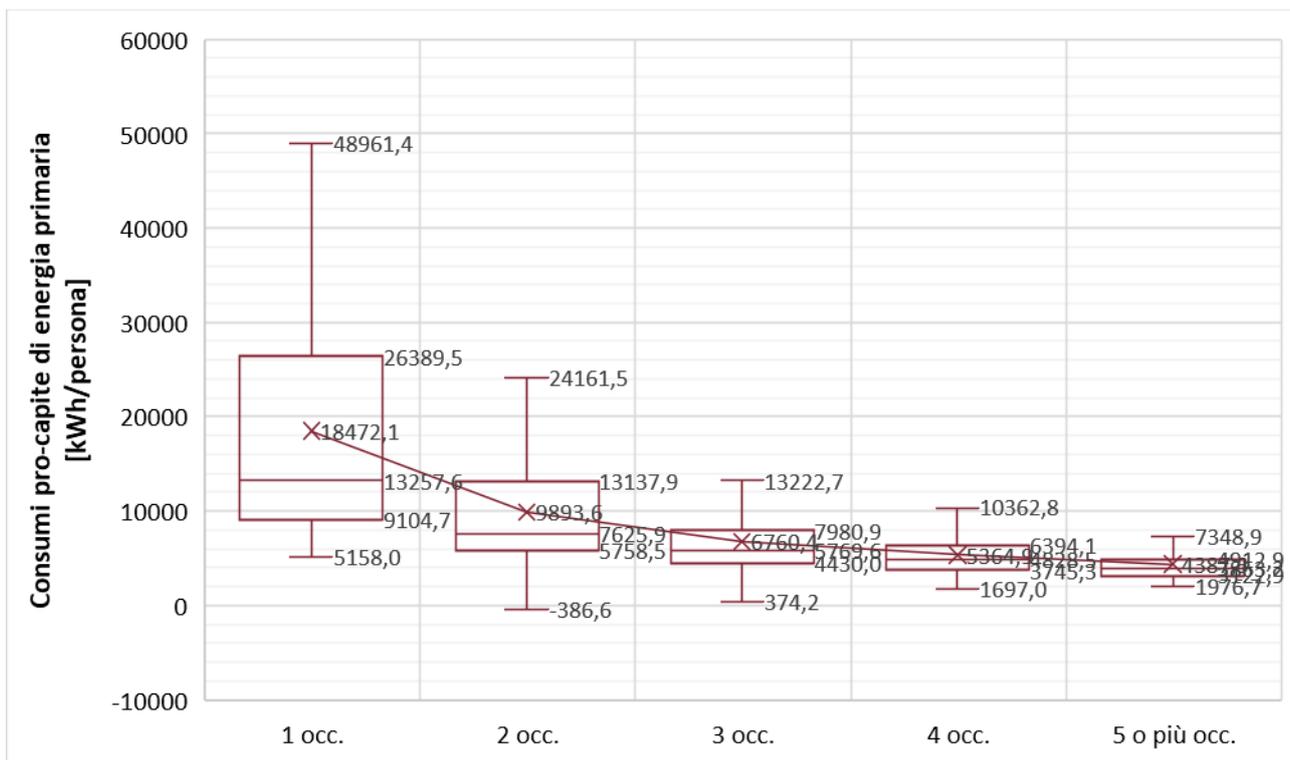


Figura 2.32 – Consumi di energia primaria pro-capite.

I consumi di energia primaria per unità di superficie sono mediamente pari a 157,9 kWh/m²; il primo quartile ha consumi di energia primaria per unità di superficie inferiori a 119,3 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 152,6 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 190,8 kWh/m².

I consumi di energia primaria per unità di superficie diminuiscono al crescere della dimensione dell'abitazione (Figura 2.29); in particolare, per piccole abitazioni i consumi specifici solo pari mediamente a 254,7 kWh/m², mentre per le grandi abitazioni i consumi specifici sono pari mediamente a 133,3 kWh/m².

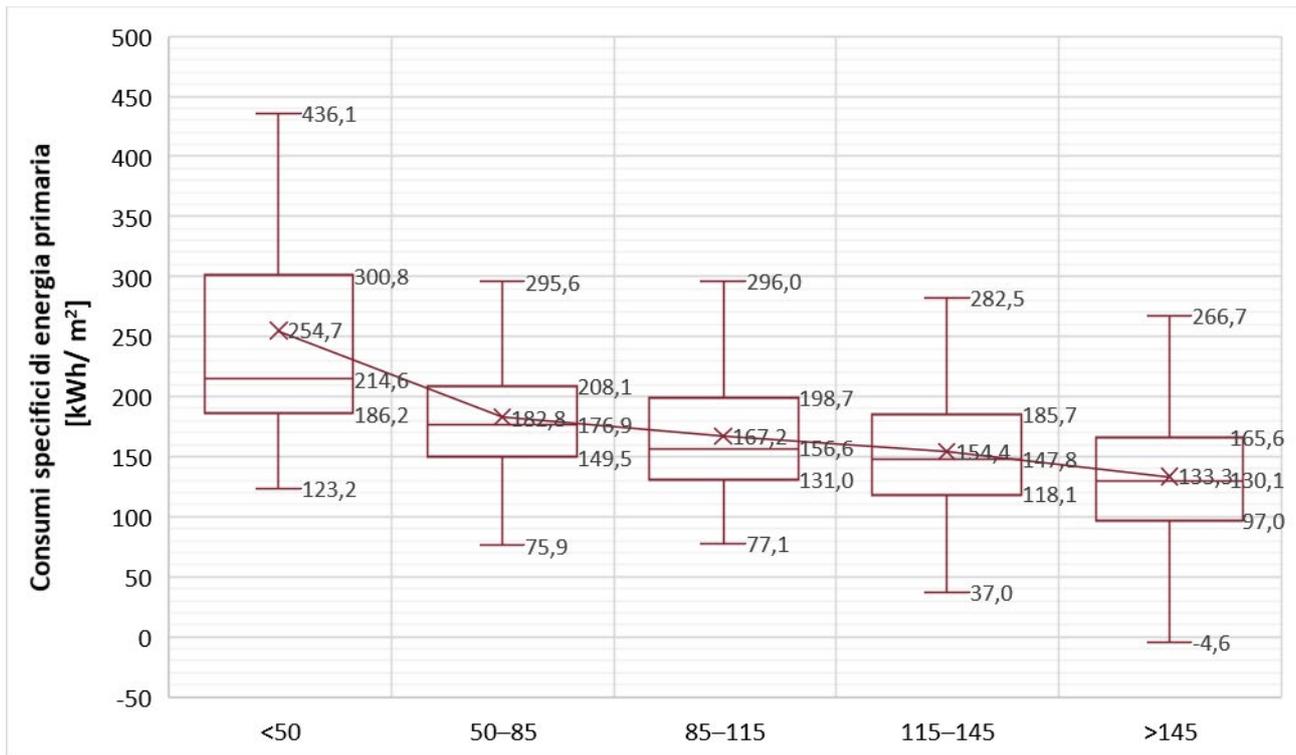


Figura 2.33 – Consumi di energia primaria per unità di superficie.

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per i consumi di energia primaria dell’abitazione, con il significato dei simboli sopra definito.

$$CP = -9580,6 + 66,733 \cdot S + 386,70 \cdot N + 12,053 \cdot GG \quad (2.5)$$

$$CP = 9829,3 + 80,501 \cdot S - 207,31 \cdot N \quad (2.6)$$

Nella (2.5) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una buona correlazione (R multiplo= 0,76); nella (2.6) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una buona correlazione (R multiplo= 0,67) sebbene minore della precedente.

Sono state anche individuate le funzioni di regressione relativamente ai consumi di energia primaria, per i servizi singoli di riscaldamento, preparazione acqua calda sanitaria e cucina.

Per quanto riguarda il riscaldamento:

$$CP_{RISC} = -14911,1,6 + 67,559 \cdot S - 1316,2 \cdot N + 12,495 \cdot GG \quad (2.7)$$

$$CP_{RISC} = 5211,3 + 81,832 \cdot S - 1932,0 \cdot N \quad (2.8)$$

Nella (2.7) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una buona correlazione (R multiplo= 0,79); nella (2.8) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una buona correlazione (R multiplo= 0,69) sebbene minore della precedente.

Per quanto riguarda la preparazione di acqua calda sanitaria:

$$CP_{ACS} = 479,38 - 0,30012 \cdot S + 553,44 \cdot N \quad (2.9)$$

Nella (2.9) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta una buona correlazione (R multiplo= 0,62).

Per quanto riguarda la cucina:

$$CP_K = 1344,2 + 1,3790 \cdot S + 294,48 \cdot N \quad (2.10)$$

Nella (2.10) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta una bassa correlazione (R multiplo= 0,33).

2.4.4 Elettrificazione delle abitazioni

E' stata effettuata una valutazione parametrica relativamente alla elettrificazione delle abitazioni, definita come rapporto in termini di energia primaria tra i consumi elettrici e i consumi totali dell'abitazione, considerando tale rapporto in funzione del numero di occupanti dell'abitazione e in funzione delle classi dimensionali individuate.

L'elettrificazione delle 1545 abitazioni è mediamente pari al 39,1%; il primo quartile ha un'elettrificazione inferiore al 26,3%; il secondo quartile inferiore al 38,0%; il terzo quartile inferiore al 50,1%.

L'ampliamento del database ha portato abitazioni maggiormente elettrificate: per questo motivo l'elettrificazione media è passata dal 35,8% (database 751 abitazioni) al 39,1% attuale (database 1545 abitazioni).

Al variare del numero di occupanti dell'abitazione (Figura 2.34) non si osservano significative differenze in termini di elettrificazione delle abitazioni; per abitazioni con un occupante l'elettrificazione è pari al 32,9%; per abitazioni con due occupanti l'elettrificazione è pari al 37,6%; per abitazioni con tre occupanti l'elettrificazione è mediamente pari a 39,7%; per abitazioni con quattro occupanti l'elettrificazione è pari al 40,1%; per abitazioni con 5 o più occupanti l'elettrificazione è pari al 42,2%.

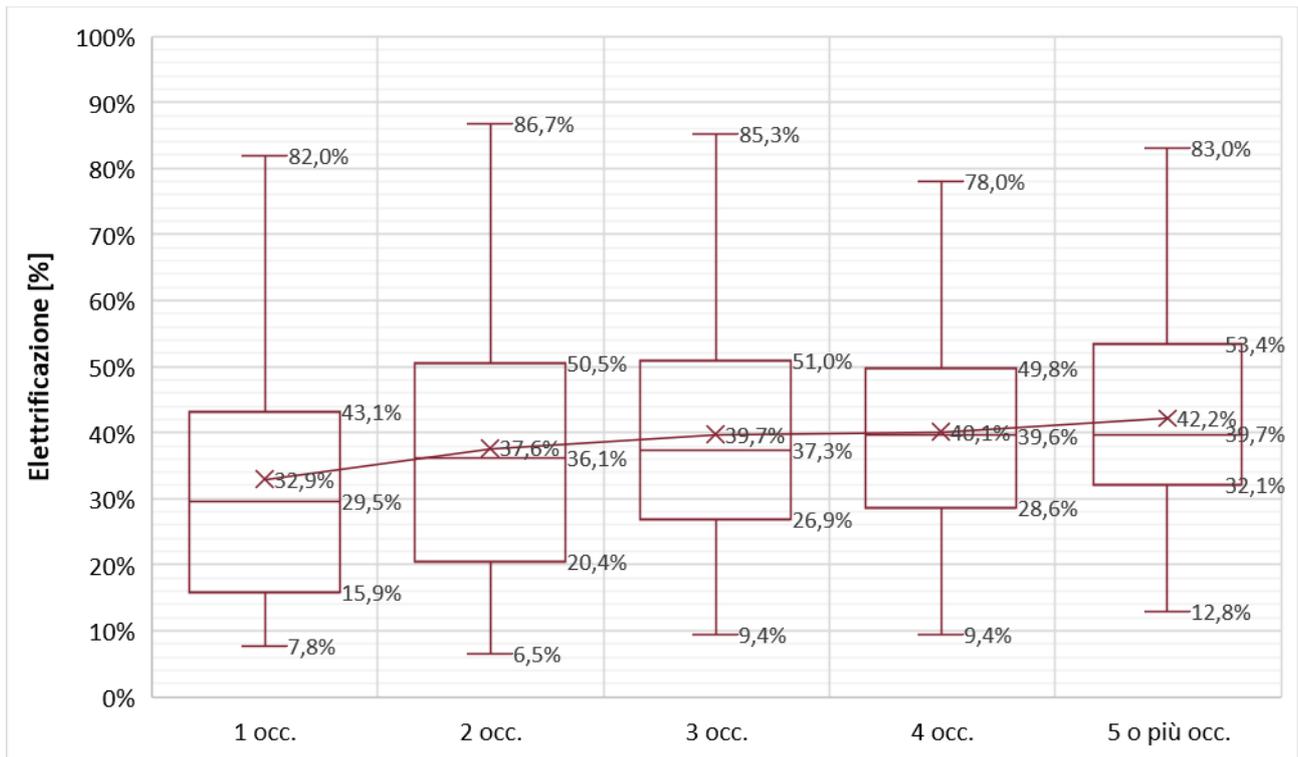


Figura 2.34 – Elettrificazione delle abitazioni Vs occupanti.

Al variare della dimensione dell'abitazione si osserva una lieve diminuzione dell'elettrificazioni per le abitazioni più grandi (Figura 2.35); in particolare, per piccole abitazioni l'elettrificazione è mediamente pari al 53,1%; per abitazioni medio-piccole, l'elettrificazione è mediamente pari al 50,4%; per abitazioni medie, l'elettrificazione è del 43,3%; per abitazioni medio-grandi è del 39,2%; per abitazioni grandi è del 29,2%.

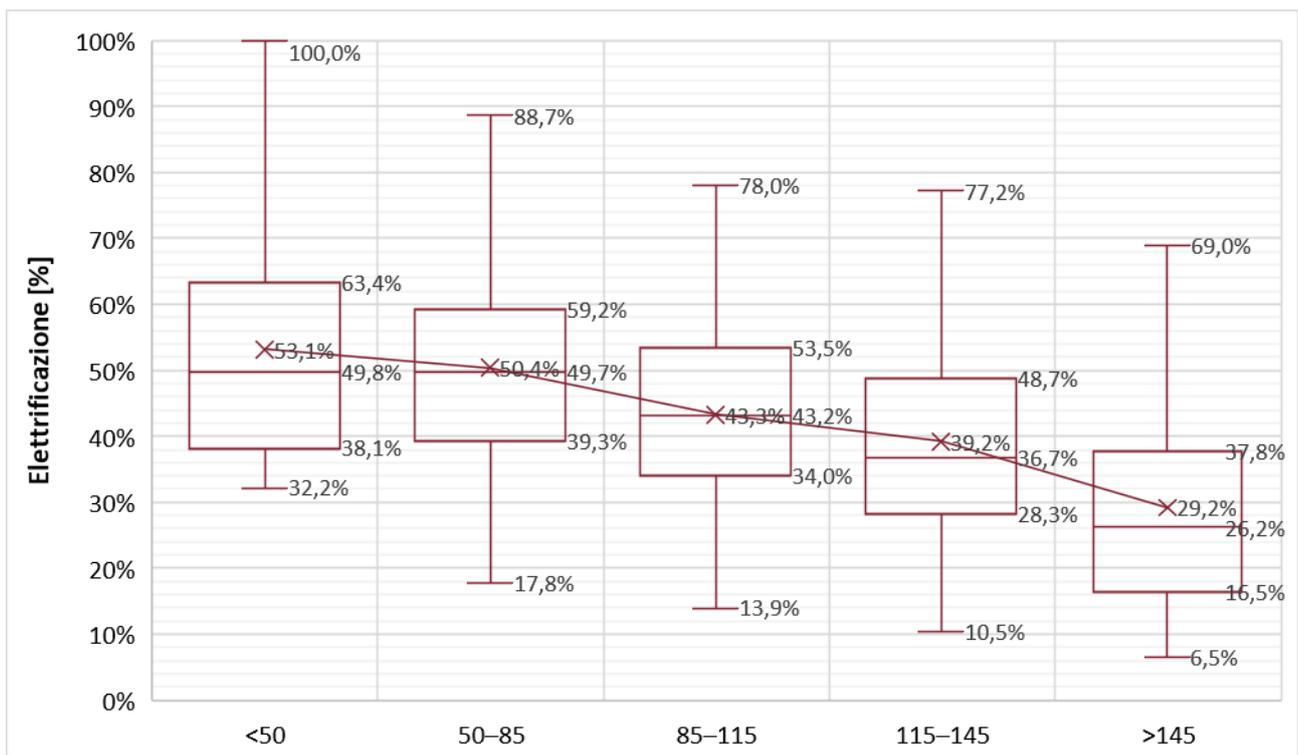


Figura 2.35 – Elettrificazione delle abitazioni Vs classi di superficie.

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per l'elettrificazione delle abitazioni, con il significato dei simboli sopra definito.

$$Ef = 0,77640 - 0,00066550 \cdot S + 0,020958 \cdot N - 0,00022077 \cdot GG \tag{2.11}$$

$$Ef = 0,42087 - 0,00091769 \cdot S + 0,031838 \cdot N \tag{2.12}$$

Nella (2.11) l'elettrificazione è espressa in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una buona correlazione (R multiplo= 0,61); nella (2.12) l'elettrificazione è espressa in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una minore correlazione (R multiplo= 0,46) in linea con la precedente.

2.4.5 Carichi elettrici accumulabili

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei carichi elettrici accumulabili, considerando i carichi accumulabili pro-capite in funzione del numero di occupanti dell'abitazione e i carichi accumulabili per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

I carichi accumulabili pro-capite sono mediamente pari a 158,5 kWh/persona; il primo quartile ha carichi accumulabili pro-capite inferiori a 37,3 kWh/persona; il secondo quartile inferiori a 64,8 kWh/persona; il terzo quartile inferiori a 121,0 kWh/persona.

Al crescere del numero di occupanti dell'abitazione (Figura 2.36), i carichi elettrici accumulabili pro-capite diminuiscono, passando da 248,2 kWh/persona (1 occupante) a 95,7 kWh/persona (5 o più occupanti).

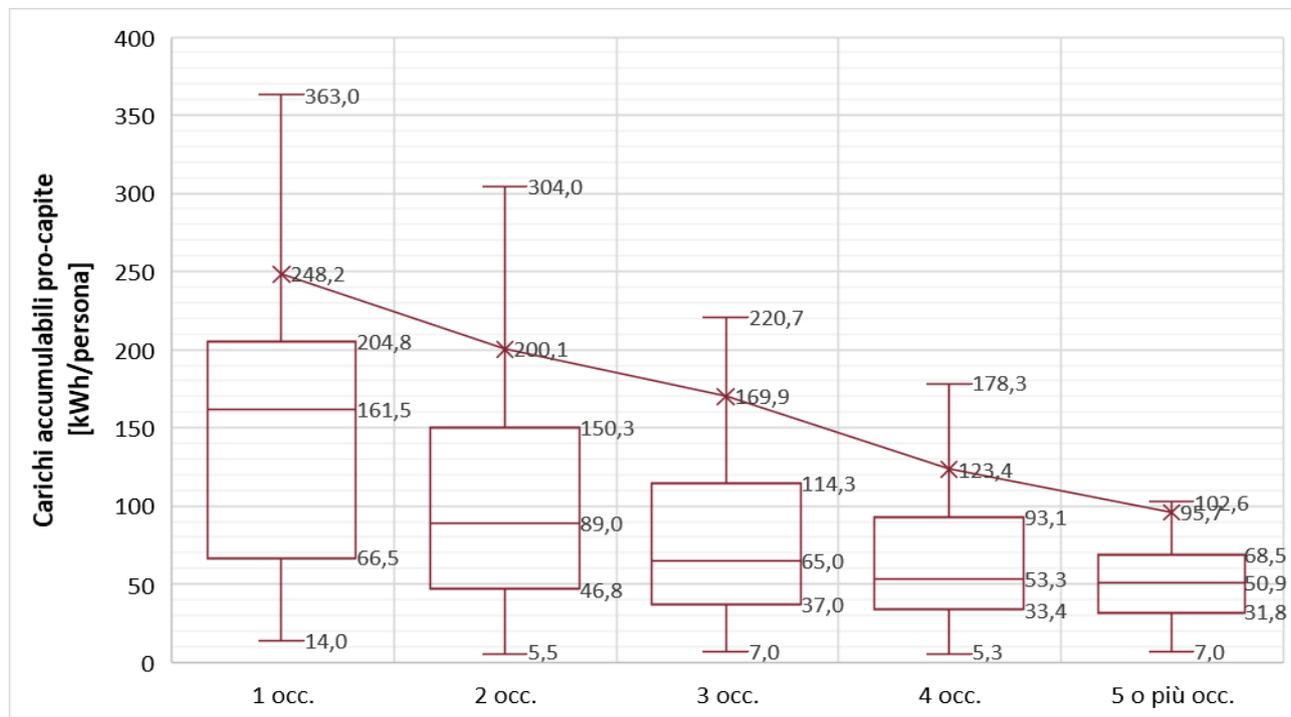


Figura 2.36 – Carichi accumulabili pro-capite.

I carichi elettrici accumulabili per unità di superficie sono mediamente pari a 4,0 kWh/m²; il primo quartile ha carichi accumulabili elettrica per unità di superficie inferiori a 0,8 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 1,3 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 3,0 kWh/m².

I carichi elettrici accumulabili per unità di superficie diminuiscono al crescere della dimensione dell’abitazione (Figura 2.37); in particolare, per piccole abitazioni i carichi accumulabili specifici solo pari mediamente a 11,3 kWh/m², mentre per le grandi abitazioni i carichi accumulabili specifici sono pari mediamente a 2,2 kWh/m².

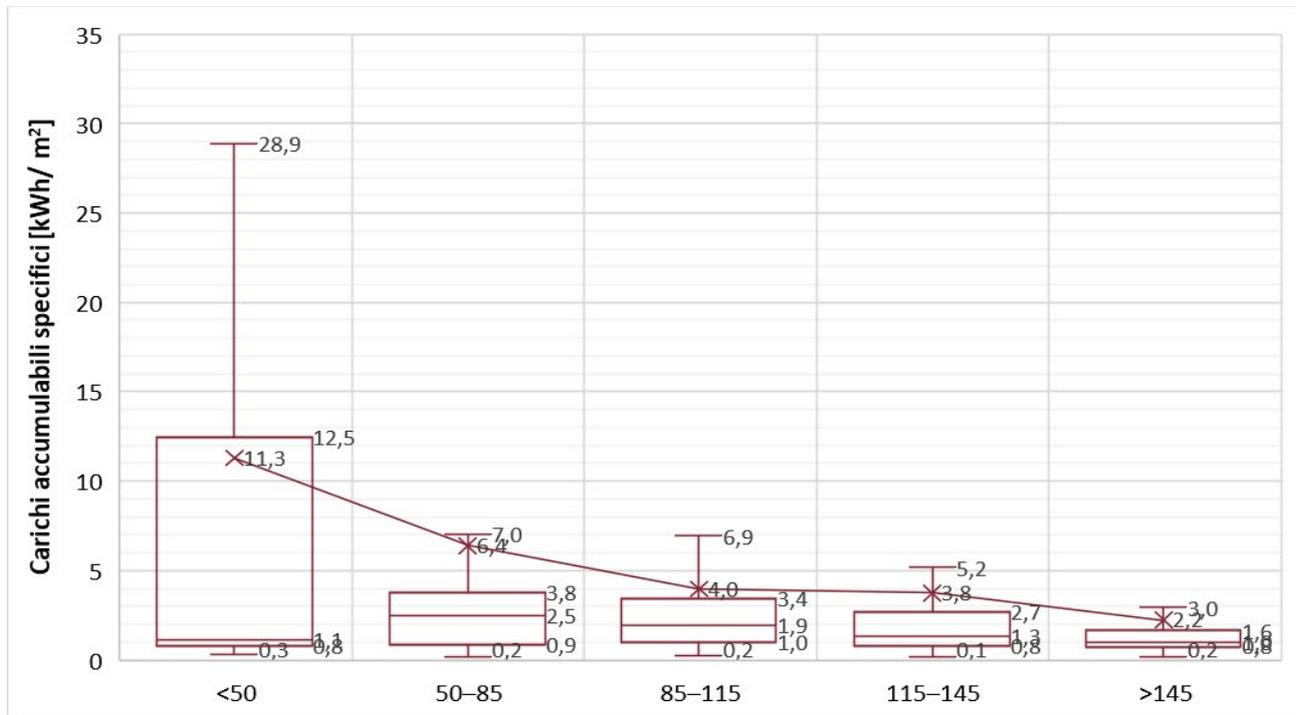


Figura 2.37 – Carichi accumulabili per unità di superficie.

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per i carichi elettrici accumulabili delle abitazioni, con il significato dei simboli sopra definito.

$$ACC = 461,76 + 1,0711 \cdot S + 28,588 \cdot N - 0,15379 \cdot GG \quad (2.13)$$

$$ACC = 214,09 + 0,89539 \cdot S + 36,167 \cdot N \quad (2.14)$$

Nella (2.13) i carichi accumulabili sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una correlazione molto bassa (R multiplo= 0,14); nella (2.14) i carichi accumulabili sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una correlazione molto bassa (R multiplo= 0,13) in linea con la precedente.

2.4.6 Carichi elettrici differibili

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei carichi elettrici differibili, considerando i carichi differibili pro-capite in funzione del numero di occupanti dell’abitazione e i carichi differibili per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

I carichi differibili pro-capite sono mediamente pari a 218,8 kWh/persona; il primo quartile ha carichi differibili pro-capite inferiori a 142,7 kWh/persona; il secondo quartile inferiori a 202,0 kWh/persona; il terzo quartile inferiori a 269,5 kWh/persona.

Al crescere del numero di occupanti dell’abitazione (Figura 2.36), i carichi elettrici differibili pro-capite diminuiscono, passando da 305,0 kWh/persona (1 occupante) a 196,3 kWh/persona (5 o più occupanti).

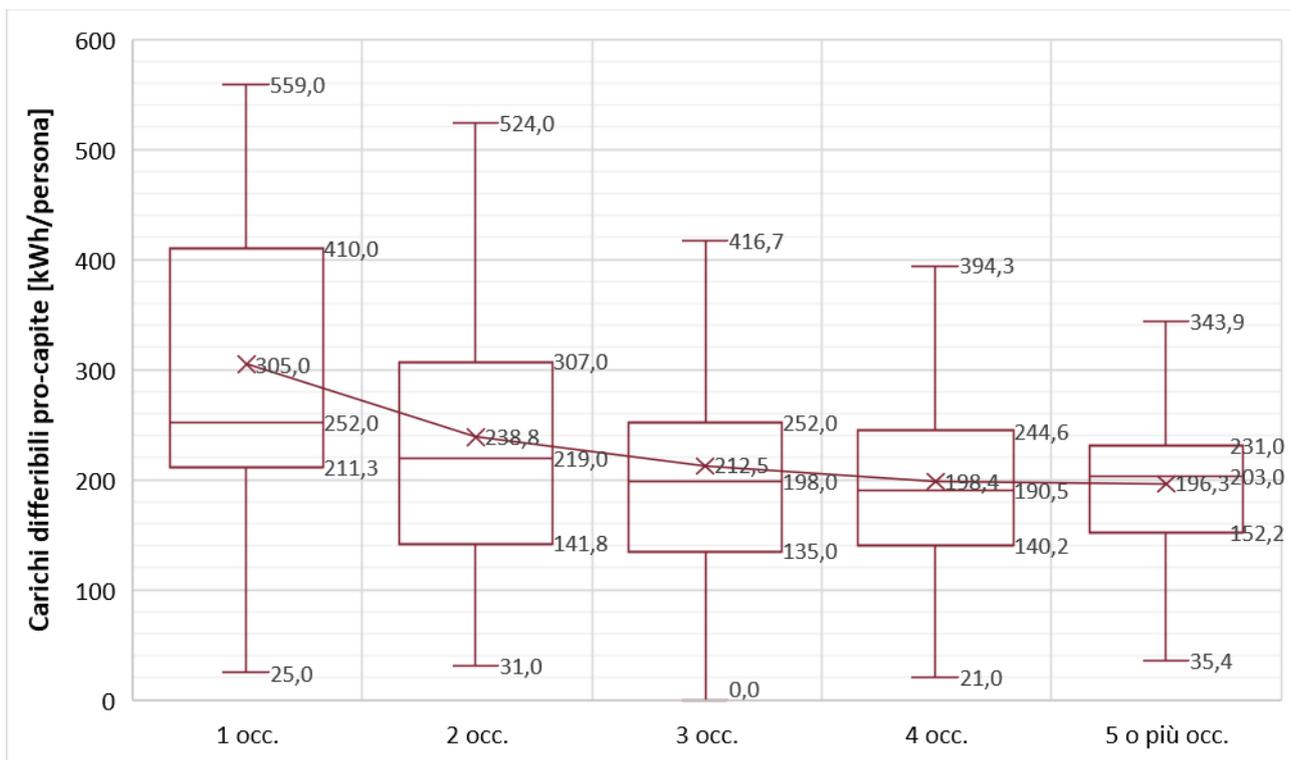


Figura 2.38 – Carichi differibili pro-capite.

I carichi elettrici differibili per unità di superficie sono mediamente pari a 5,4 kWh/m²; il primo quartile ha carichi differibili elettrica per unità di superficie inferiori a 2,9 kWh/m² il secondo quartile inferiori a 4,6 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 7,1 kWh/m².

I carichi elettrici differibili per unità di superficie diminuiscono al crescere della dimensione dell'abitazione (Figura 2.37); in particolare, per piccole abitazioni i carichi differibili specifici solo pari mediamente a 6,0 kWh/m², mentre per le grandi abitazioni i carichi differibili specifici sono pari mediamente a 3,8 kWh/m².

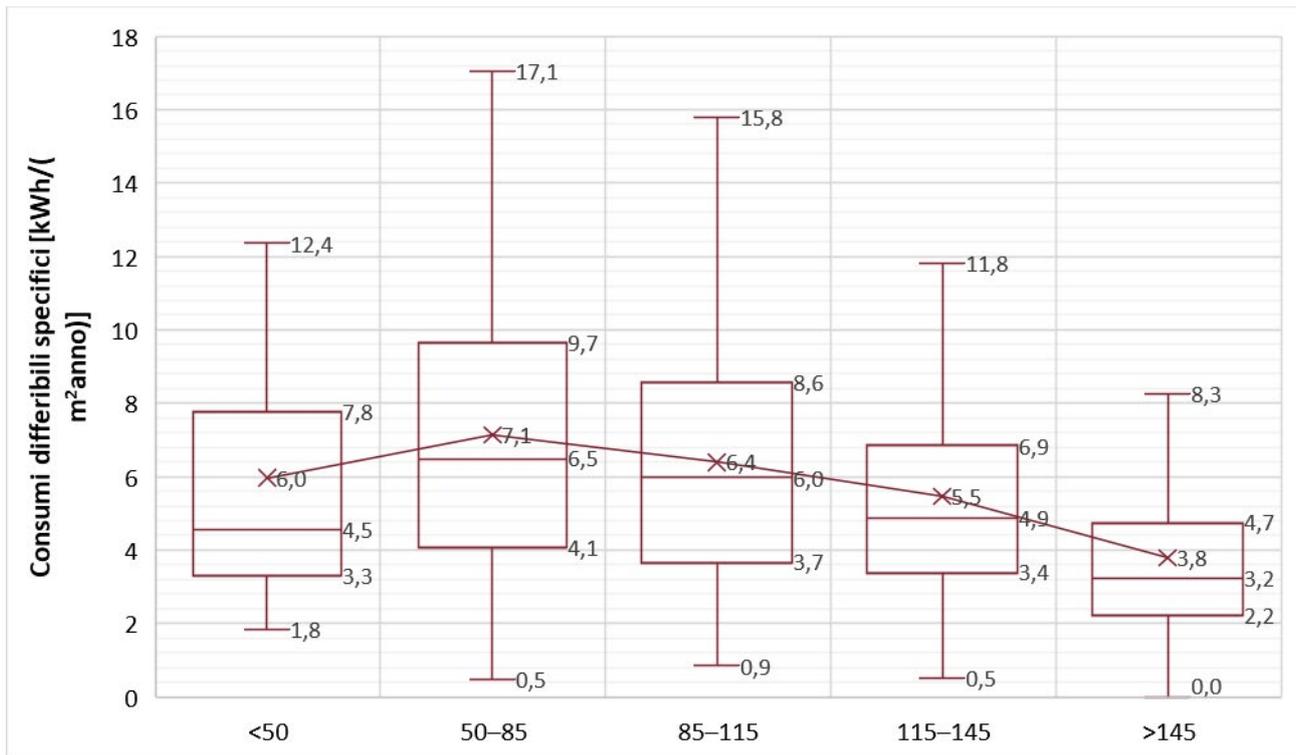


Figura 2.39 – Carichi differibili per unità di superficie.

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per i carichi elettrici differibili delle abitazioni, con il significato dei simboli sopra definito.

$$DIFF = -68,007 + 0,53732 \cdot S + 162,31 \cdot N + 0,087834 \cdot GG \quad (2.15)$$

$$DIFF = 73,442 + 0,63766 \cdot S + 157,98 \cdot N \quad (2.16)$$

Nella (2.15) i carichi differibili sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una discreta correlazione (R multiplo= 0,53); nella (2.16) i carichi differibili sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una discreta correlazione (R multiplo= 0,53) in linea con la precedente.

2.4.7 Emissioni inquinanti

E' stata effettuata una valutazione parametrica delle emissioni inquinanti, in termini di anidride carbonica equivalente, considerando le emissioni pro-capite in funzione del numero di occupanti dell'abitazione e le emissioni per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

Le emissioni inquinanti primaria pro-capite sono mediamente pari a 1323,5 kg/persona; il primo quartile ha emissioni primaria pro-capite inferiori a 690,4 kg/persona; il secondo quartile inferiori a 968,7 kg/persona; il terzo quartile inferiori a 1474,1 kg/persona.

Al crescere del numero di occupanti dell'abitazione (Figura 2.40), le emissioni inquinanti pro-capite diminuiscono, passando 3297,5 kg/persona (1 occupante) a 743,8 kg/persona (5 o più occupanti).

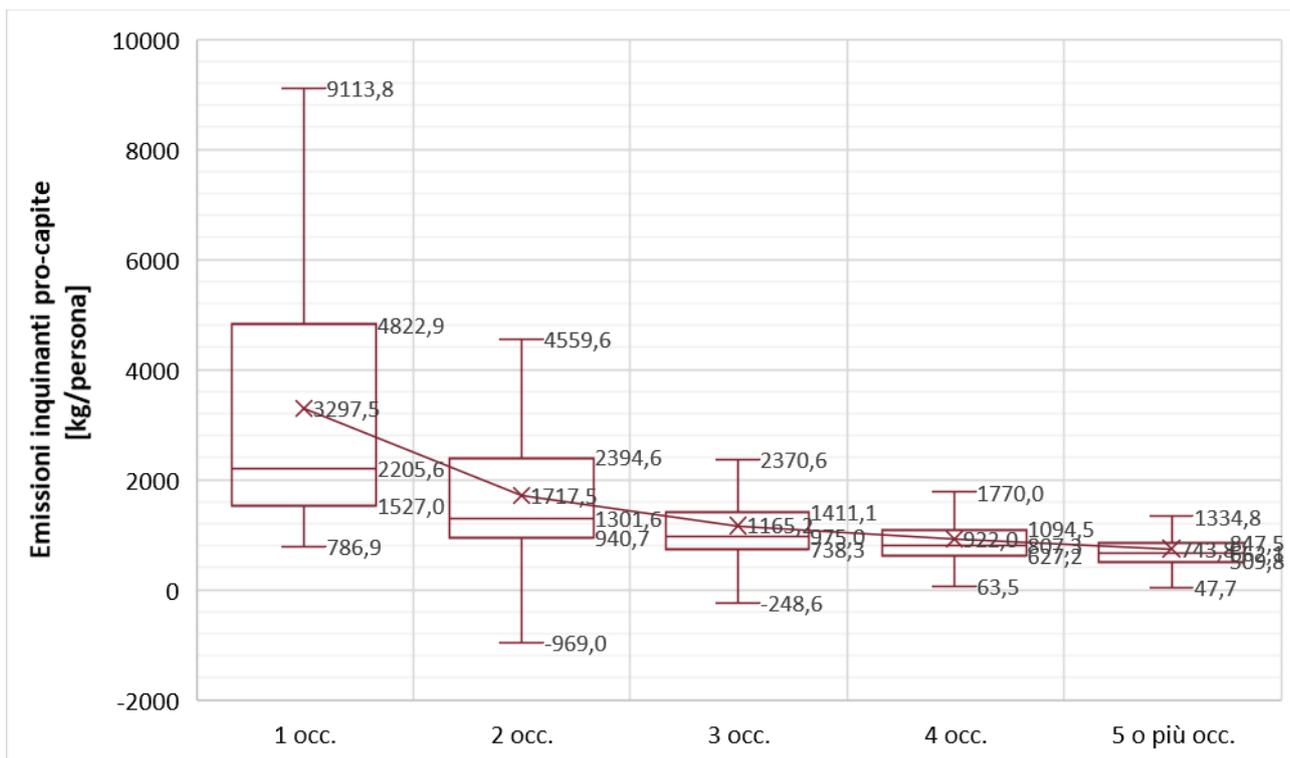


Figura 2.40 – Emissioni inquinanti in termini di anidride carbonica equivalente pro-capite.

Le emissioni inquinanti per unità di superficie sono mediamente pari a 27,0 kg/m²; il primo quartile ha emissioni inquinanti per unità di superficie inferiori a 20,3 kg/m²; il secondo quartile inferiori a 26,0 kg/m²; il terzo quartile inferiori a 33,0 kg/m².

Le emissioni inquinanti per unità di superficie diminuiscono al crescere della dimensione dell'abitazione (Figura 2.41); in particolare, per piccole abitazioni le emissioni specifiche solo pari mediamente a 40,5 kg/m², mentre per le grandi abitazioni le emissioni specifiche sono pari mediamente a 33,0 kg/m².

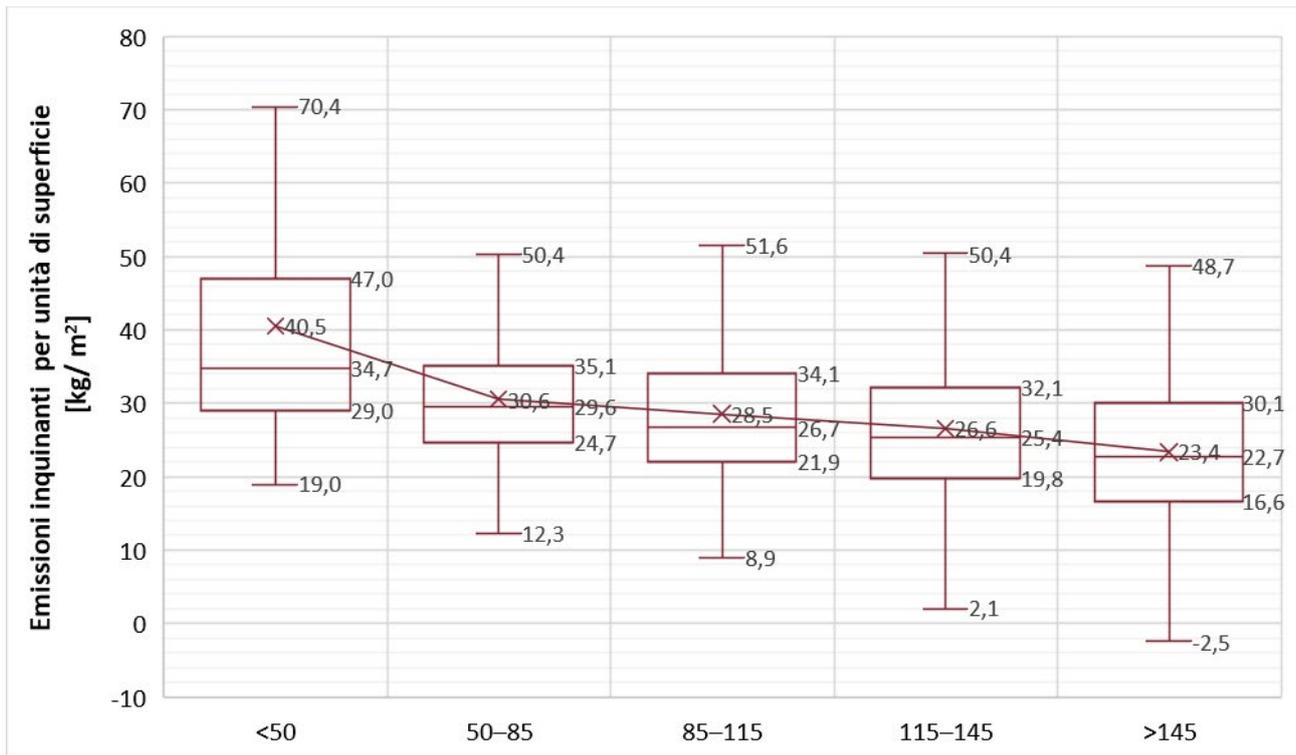


Figura 2.41 – Emissioni inquinanti in termini di anidride carbonica equivalente per unità di superficie.

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per le emissioni inquinanti dell’abitazione, con il significato dei simboli sopra definito.

$$EInq = -2052,7 + 11,638 \cdot S + 41,833 \cdot N + 2,3653 \cdot GG \quad (2.17)$$

$$EInq = 1756,3 + 14,340 \cdot S - 74,738 \cdot N \quad (2.18)$$

Nella (2.17) le emissioni inquinanti sono espresse in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una buona correlazione (R multiplo= 0,72); nella (2.18) le emissioni inquinanti sono espresse in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta una discreta correlazione (R multiplo= 0,62), più bassa della precedente.

2.4.8 Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)

E’ stata effettuata una valutazione della quota di energia rinnovabile utilizzata nelle abitazioni, come rapporto tra i consumi di energia primaria coperti mediante FER e i consumi di energia primaria complessivi; tale quota è stata considerata in funzione del numero di occupanti dell’abitazione e in funzione delle classi dimensionali individuate. Tale quota è legata alla produzione di energia elettrica da impianti fotovoltaici e all’utilizzo della rinnovabile aerotermica ove siano presenti pompe di calore come generatore di riscaldamento.

Mediamente la quota di energia rinnovabile è pari al 8,0%; il primo quartile delle abitazioni impiega FER per una quota inferiore al 5,3% dei propri consumi; il secondo quartile per una quota inferiore al 7,6%; il terzo quartile per una quota inferiore al 9,9%.

In funzione del numero di occupanti delle abitazioni (Figura 2.42) la quota di FER è via via crescente, passando dal 6,6% nelle abitazioni con 1 occupante al 8,5% nelle abitazioni con 5 o più occupanti.

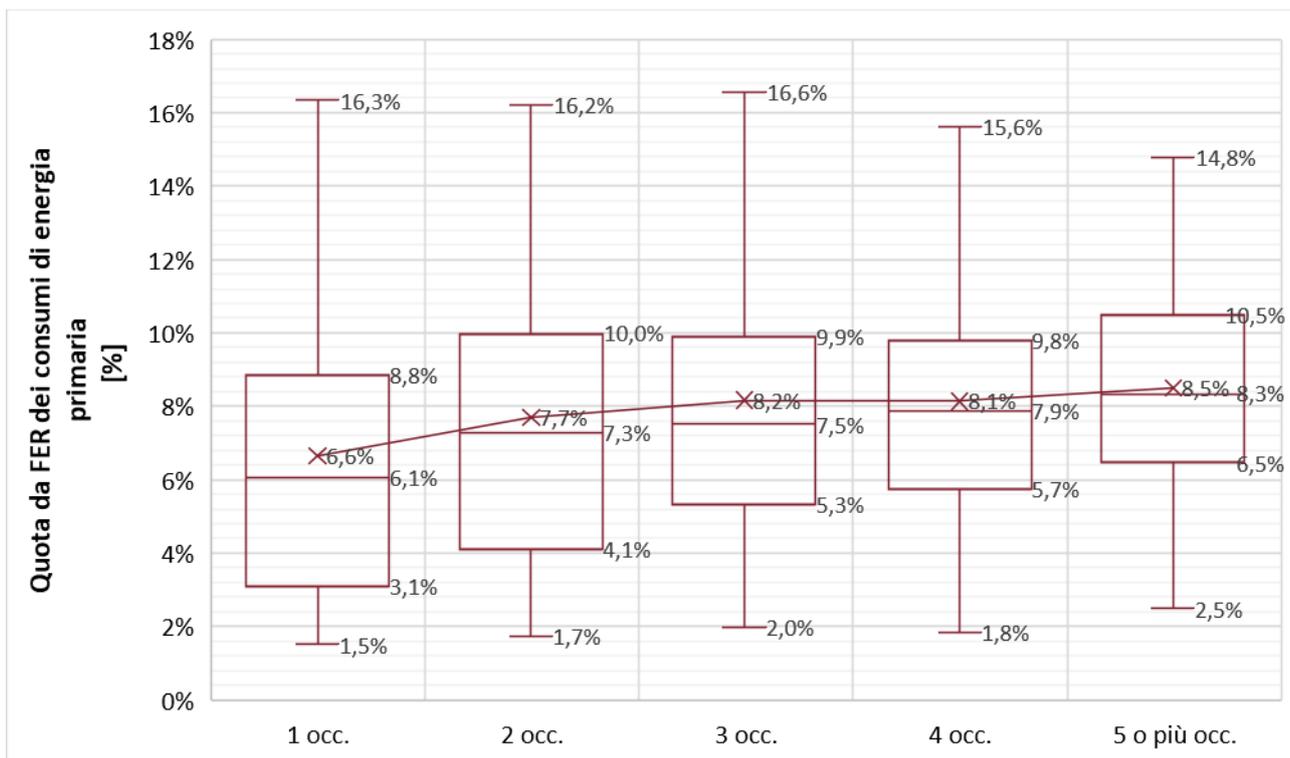


Figura 2.42 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione del numero di occupanti.

Al crescere della dimensione dell'abitazione (Figura 2.43) diminuisce la quota di FER impiegata; in particolare, per piccole abitazioni la quota di FER è mediamente pari al 11,3%, mentre per le grandi abitazioni la quota di FER è mediamente pari al 6,4%.

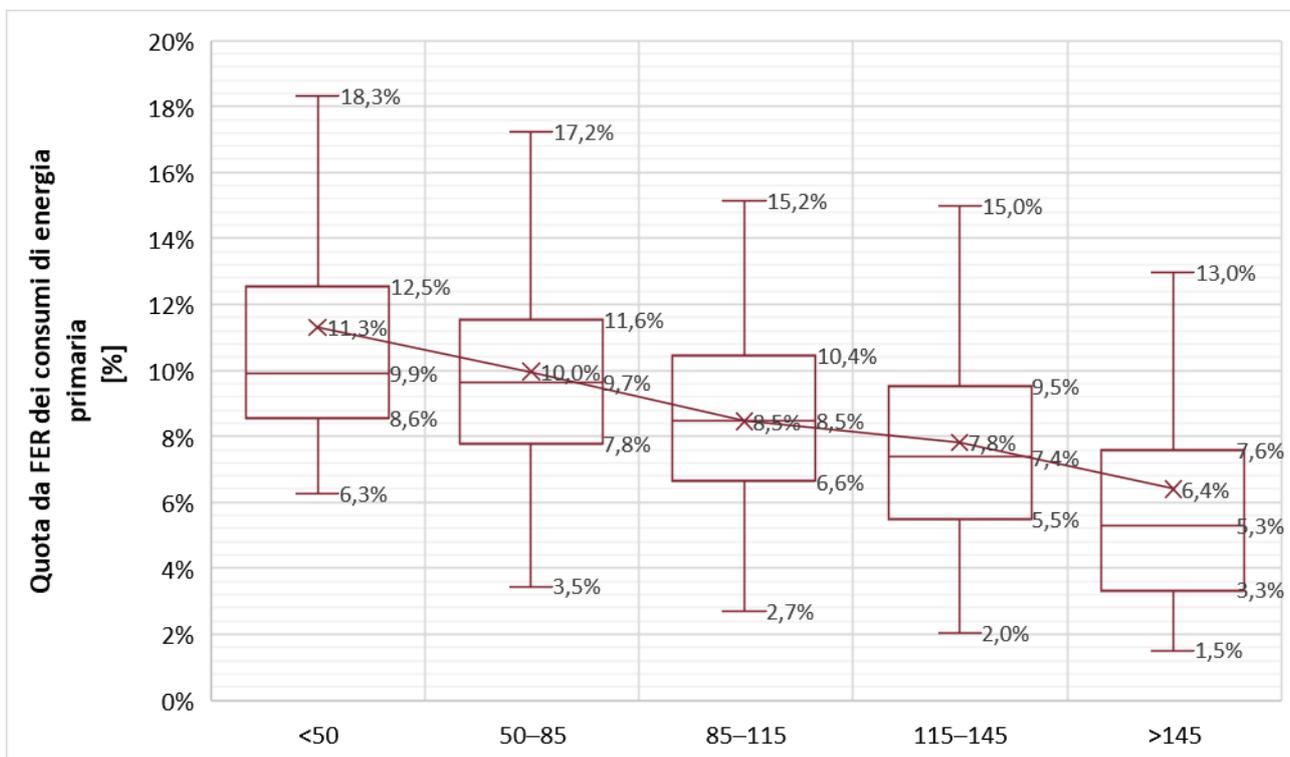


Figura 2.43 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione delle classi dimensionali individuate.

Come descritto al par.2.2.4, nessuno degli impianti fotovoltaici presenti è dotato di batteria di accumulo. Pertanto, ove sono presenti gli impianti fotovoltaici, oltre all'autoconsumo di energia elettrica, si ha cessione alla rete dell'energia autoprodotta che non viene autoconsumata; complessivamente l'energia esportata equivale all'1,1% dei consumi complessivi di energia primaria delle abitazioni.

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per la quota di energia primaria da FER consumata nelle abitazioni, con il significato dei simboli sopra definito.

$$FER\% = 0,15926 - 8,0927 \cdot 10^{-5} \cdot S + 3,0431 \cdot 10^{-3} \cdot N - 4,8123 \cdot 10^{-5} \cdot GG \quad (2.19)$$

$$FER\% = 0,081766 - 1,3590 \cdot 10^{-4} \cdot S + 5,4148 \cdot 10^{-3} \cdot N \quad (2.20)$$

Nella (2.19) la quota di utilizzo delle FER è espressa in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una discreta correlazione (R multiplo= 0,44); nella (2.20) la quota di utilizzo delle FER è espressa in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta una correlazione bassa (R multiplo= 0,28).

3 Implementazioni del foglio di calcolo e pubblicazione su piattaforma web

In questa ultima annualità di ricerca sono stati effettuati degli aggiornamenti del foglio di calcolo e sono state introdotte delle funzionalità aggiuntive, con l’obiettivo (i) di migliorare il processo di simulazione energetica, (ii) di facilitare l’immissione dei dati di input, (iii) di adeguare il calcolo della prestazione energetica degli elettrodomestici alle nuove Direttive Comunitarie [5][6] e (iv) di incrementare le funzioni e quindi l’attrattività del foglio di calcolo.

La versione aggiornata del foglio di calcolo è stata quindi utilizzata per la realizzazione di una piattaforma web, nella quale funziona come motore di calcolo.

3.1 Aggiornamenti del foglio di calcolo

Al fine di migliorare il processo di simulazione sono stati apportati i seguenti aggiornamenti al foglio di calcolo:

- è stata aggiornata la modalità di calcolo dell’irraggiamento e della temperatura esterna, introducendo una funzione che tiene conto dell’altitudine della località;
- è stata modificata la capacità consigliata per la batteria di accumulo del fotovoltaico portandola al 33% della produzione giornaliera;
- sono state aggiunte nel calcolo le perdite energetiche connesse al carica/scarica delle batterie;
- è stata implementata la possibilità di usare i condizionatori anche come generatore di calore per il riscaldamento, in regime di funzionamento prioritario rispetto alla caldaia.

Alla luce degli aggiornamenti indicati all’ultimo punto, la sezione 3.2 Raffrescamento si presenta ora come in Figura 3.1.

3.2 IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO		
Tipo di impianto di raffrescamento	Condizionatore elettrico	
Classe energetica media in raffrescamento	F	
Numero di stanze climatizzate	2	su un totale di 7 stanze
Utilizzo dei condizionatori anche per il riscaldamento	NO	
ALTRI APPARECCHI	QUANTITA'	ORE USO GIORNALIERO
Ventilatore	3	10
Deumidificatore portatile	0	

Figura 3.1 – Sezione 3.2 Impianto di raffrescamento.

Al fine di facilitare l’immissione dei dati di input e di adeguare il calcolo della prestazione energetica alle nuove Direttive Comunitarie in materia di etichettatura energetica degli elettrodomestici:

- è stata modificata la modalità di immissione dati relativamente alle apparecchiature per la refrigerazione, avendo osservato una generale difficoltà nel reperire informazioni relativamente alla capacità del frigorifero.
- sono state introdotte le nuove classi energetiche previste dalle Direttive Comunitarie riguardanti l’etichettatura energetica degli elettrodomestici.

Alla luce degli aggiornamenti indicati, le sezioni 4.2 Refrigerazione e 4.3 Lavaggio, Pulizia, Stiratura si presentano ora come in Figura 3.2 e Figura 3.3.

In entrambe deve essere ora indicato l'anno di acquisto scegliendo tra "Entro il 2020" e "Dal 2021 in poi" e indicando poi la Classe Energetica; le prestazioni degli elettrodomestici saranno quindi caricate in maniera congruente con le indicazioni date.

Relativamente alla sezione Refrigerazione, in funzione del tipo di frigorifero, sono ora richiesti il numero di stelle e le dimensioni fisiche (espresse in cm) del frigorifero e del freezer.

4.2 REFRIGERAZIONE									
TIPO DI FRIGORIFERO	NUMERO STELLE	DIMENSIONI [cm]			Altezza freezer	VOLUME INTERNO [litri]		ANNO DI ACQUISTO	CLASSE ENERGETICA
		Larghezza	Altezza	Profondità		Totale	Freezer		
Nessuno								Entro il 2020	
Nessuno								Entro il 2020	
Nessuno								Entro il 2020	

Figura 3.2 – Sezione 4.2 Refrigerazione.

4.3 LAVAGGIO, PULIZIA E STIRATURA					
	CAPACITA' DI CARICO	CICLI SETTIMANALI		ANNO DI ACQUISTO	CLASSE ENERGETICA
Lavatrice [kg]	7		5,0	Entro il 2020	A
Asciugatrice [kg]	5	5,6 (val. medio per 4 persone)		Dal 2021 in poi	B
Lavastoviglie [coperti]	6	5,8 (val. medio per 5 o più persone)		Dal 2021 in poi	A
Lavasciuga [kg]	5	1,9 (val. medio per 1 persona)		Entro il 2020	C
MINUTI USO GIORN.					
Aspirapolvere		5			
Scopa elettrica		10			
Ferro da stiro senza caldaia		5			
Ferro da stiro con caldaia		10			

Figura 3.3 – Sezione 4.3 lavaggio, Pulizia, Stiratura.

3.2 Funzioni aggiuntive del foglio di calcolo

Nella versione precedente, il foglio di calcolo consentiva la simulazione di una serie di interventi volti al miglioramento della prestazione energetica dell'abitazione, quali la riqualificazione energetica dell'involucro edilizio, la sostituzione dei generatori di calore, la sostituzione delle apparecchiature presenti e l'introduzione di impianti alimentati da fonti rinnovabili.

Tali interventi erano tuttavia proposti singolarmente, e ciò non consentiva di considerare eventuali situazioni di non sommabilità dei benefici ottenuti.

Al fine di superare tale limitazione e volendo offrire una più ampia gamma di indicazioni per il miglioramento della prestazione energetica dell'abitazione, è stato aggiunto il calcolo di interventi di riqualificazione raggruppati, sulla base delle più comuni modalità di svolgimento dei lavori:

1. impianto fotovoltaico con accumulo;
2. isolamento copertura e sostituzione infissi;
3. isolamento di tutto l'involucro;
4. sostituzione elettrodomestici; Sostituzione generatori termici;
5. isolamento copertura + sostituzione infissi + impianto fotovoltaico;
6. isolamento copertura + sostituzione infissi + generatori + impianto fotovoltaico;
7. isolamento copertura + sostituzione infissi + elettrodomestici, luci, condizionatori e generatori + impianto FV con accumulo;
8. isolamento di tutto l'involucro + sostituzione infissi, elettrodomestici, luci, condizionatori e generatori + impianto FV con accumulo.

Una funzione aggiunta in questa versione del foglio di calcolo è la valutazione economica di ognuno degli interventi esaminati con calcolo del tempo di ritorno sulla base dei risparmi conseguibili (Figura 3.4).

La stima dei costi di intervento si basa su valutazioni mirate derivanti da prezzari regionali o da elaborazioni desunte da analisi di mercato, che hanno portato all'individuazione di costi parametrici caratteristici a seconda della tipologia di intervento (€/kW, €/m², €/m³); tali costi sono da considerarsi comprensivi di materiali, componenti e posa in opera.

TABELLA INTERVENTI (ORDINATA)																
Nome	P_FV	EP_gas	EP_ele_pt	EP_ele_s	EP_ele_r	SPESA_g	SPESA_el	ACCU	DIFF	NONDIFF	EP_tot	Variazione_E Classe E CO2			Investimento	Ritorno
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1 Isolamento di tutto l'involucro; sc	9,08	0	31	-12454	-7951	0	46	2280	0	2236	-12423	-39960	A4	-2,8	106350	>30
2 Isolamento di tutto l'involucro; sc	9,08	0	5126	-13392	-10994	0	379	2280	0	2236	-8266	-35802	A4	-3,1	81578	17
3 Isolamento copertura; sostituzior	9,08	0	9030	-13392	-11022	0	687	3866	0	2236	-4362	-31898	A4	-2,5	57026	13
4 Isolamento di tutto l'involucro; sc	9,08	8203	2195	-13392	-11146	881	186	984	0	2169	-2993	-30530	A2	-2,0	81374	24
5 Impianto fotovoltaico con accum	9,08	71	12301	-12454	-6188	99	930	9110	0	2240	-83	-27619	A4	-0,4	44747	19
6 Tutto elettrico con fotovoltaico	9,08	0	13786	-13392	-11017	0	1024	5765	0	2307	395	-27142	A4	-1,9	22291	7
7 Isolamento copertura; sostituzior	9,08	71	14144	-13392	-11009	99	1047	5988	0	2240	822	-26714	A4	-1,8	51750	12
8 Isolamento copertura; sostituzior	9,08	16258	2583	-13392	-11204	1676	211	1086	0	2169	5449	-22088	C	-0,4	56822	>30
9 Impianto fotovoltaico	9,08	71	21734	-13392	-11023	99	1559	9110	0	2240	8413	-19124	A4	-0,7	19975	7
10 Isolamento di tutto l'involucro	0,00	71	13634	0	0	99	1015	3394	0	2240	13705	-13831	A3	2,0	56327	20
11 Sostituzione climatizzatori	0,00	71	19372	0	0	99	1396	5765	0	2240	19442	-8094	A1	2,8	8250	6
12 Riscaldamento a pompa di calore	0,00	71	19372	0	0	99	1396	5765	0	2240	19442	-8094	A1	2,8	0	0
13 Tutto elettrico	0,00	0	19533	0	0	0	1407	5765	0	2307	19533	-8004	A1	2,8	2316	2
14 Isolamento copertura e sostituzior	0,00	71	19910	0	0	99	1433	5988	0	2240	19981	-7555	A1	2,9	31775	16
15 Isolamento pareti	0,00	71	21470	0	0	99	1541	6632	0	2240	21541	-5996	B	3,1	24552	14
16 Isolamento soffitto	0,00	71	23565	0	0	99	2477	7498	0	2240	23636	-3901	B	3,4	11975	>30
17 Sostituzione infissi	0,00	71	24085	0	0	99	2477	7713	0	2240	24156	-3381	B	3,5	19800	>30
18 Sostituzione elettrodomestici	0,00	71	27321	0	0	99	2477	9116	0	2174	27392	-145	C	4,0	2950	>30
19 Sostituzione lampade	0,00	71	27454	0	0	99	2477	9110	0	2235	27525	-11	C	4,0	10	>30
20 Isolamento pavimento	0,00	71	27466	0	0	99	2477	9110	0	2240	27536	0	C	4,0	0	>30
21 Scaldabagno a pompa di calore	0,00	71	27466	0	0	99	2477	9110	0	2240	27536	0	C	4,0	1716	>30
22 Riscaldamento coi condizionator	0,00	71	27466	0	0	99	2477	9110	0	2240	27536	0	C	4,0	0	>30
23 Cucina a induzione	0,00	0	27626	0	0	0	2477	9109	0	2307	27626	90	C	4,0	600	6
24 Caldaia a condens. e valvole term	0,00	25938	8510	0	0	2649	643	1277	0	2240	34448	6911	E	6,2	2112	>30

Figura 3.4 – Quadro riepilogativo degli interventi di riqualificazione energetica simulati.

Infine, con l'obiettivo di incrementare la possibilità di confronti incrociati e di suggerimenti per l'utente è stato implementato uno scorporo dei consumi energetici, per singola apparecchiatura e per tutti mesi dell'anno.

In particolare, relativamente ai consumi elettrici (Figura 3.5), lo scorporo considera tutte le apparecchiature presenti: Illuminazione interna; piano cottura, forno a microonde, forno, griglia, ventilatore, deumidificatore portatile; Frigorifero 1, Frigorifero 2, Frigorifero 3, Lavatrice, Asciugatrice, Lavastoviglie, Lavasciuga, Aspirapolvere, Scopa elettrica, Ferro da stiro senza caldaia, Ferro da stiro con caldaia, TV, Computer fisso, Computer portatile, Modem, Stampante a getto di inchiostro, Stampante laser, Asciugacapelli, Piastra per capelli, Altro apparecchio 1, Altro apparecchio 2, Altro apparecchio 3, Generatore per riscaldamento, Ausiliari di riscaldamento, Generatore per raffrescamento, Ausiliari di raffrescamento, Generatore per ACS, Ausiliari di preparazione ACS.

In presenza di impianti fotovoltaici viene anche indicata l'energia autoprodotta, l'energia autoconsumata, l'energia ceduta alla rete e l'energia prelevata dalla rete.

DETTAGLIO DEI CONSUMI ELETTRICI

TIPO DI UTILIZZATORE	ENERGIA ELETTRICA ATTIVA ASSORBITA (kWh)												TOTALE					
	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC						
Vent. meccanica (escluse unità interne)																		
Illuminazione interna	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	54	kWh
Illuminazione esterna																		kWh
Piano cottura																		kWh
Forno a microonde																		kWh
Forno	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	67	kWh
Griglia	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	63	kWh
Ventilatore																		kWh
Deumidificatore portatile																		kWh
Frigo 1 (Frigo senza congelatore)	16	14	16	15	16	15	16	16	15	16	15	16	15	16	16	186	kWh	
Frigo 1 (Nessuno)																		kWh
Frigo 1 (Nessuno)																		kWh
Lavatrice																		kWh
Asciugatrice																		kWh
Lavastoviglie																		kWh
Lavasciuga																		kWh
Aspirapolvere																		kWh
Scopa elettrica																		kWh
Ferro da stiro senza caldaia																		kWh
Ferro da stiro con caldaia																		kWh
TV	8	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	95	kWh
Computer fisso																		kWh
Computer portatile	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	25	kWh
Modem	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	88	kWh
Stampante a getto di inchiostro																		kWh
Stampante laser																		kWh
Asciugacapelli																		kWh
Piastra per capelli																		kWh
Altro apparecchio 1 (0)																		kWh
Altro apparecchio 1 (0)																		kWh
Altro apparecchio 1 (0)																		kWh
Altro apparecchio 1 (Apparecchio 4)																		kWh
Generatore per riscaldamento																		kWh
Auxiliari di riscaldamento	8	7	5	1	1	1	1	1	1	1	1	4	8	8	8	37	kWh	
Generatore per raffreddamento							20	135	131	2							289	kWh
Auxiliari di raffreddamento	1	1	1	1	1	1	1	5	5	1	1	1	1	1	1	1	19	kWh
Generatore per ACS																		kWh
Auxiliari di produzione ACS	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	17	kWh	
TOTALE FABBISOGNO	61	54	57	50	51	70	191	187	52	53	54	60	940	940	940	940	940	kWh
ENERGIA AUTOPRODOTTA	23	26	37	45	50	55	63	55	44	35	23	23	480	480	480	480	480	kWh
ENERGIA AUTOCOCONSUMATA	20	19	22	23	25	25	27	26	23	22	19	20	271	271	271	271	271	kWh
ENERGIA CEDUTA ALLA RETE	3	7	15	22	25	30	36	30	21	13	4	3	209	209	209	209	209	kWh
ENERGIA PRELEVATA DALLA RETE	41	35	34	26	26	45	164	161	29	31	35	40	668	668	668	668	668	kWh

Figura 3.5 – Dettaglio dei consumi elettrici.

Relativamente ai consumi di gas (Figura 3.6), lo scorporo considera tutte le apparecchiature presenti: Generatore per riscaldamento, Generatore per ACS, Usi di gas per la cucina.

DETTAGLIO DEI CONSUMI DI GAS NATURALE

TIPO DI UTILIZZATORE	CONSUMI DI GAS [Sm³]												TOTALE				
	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC					
Generatore per riscaldamento	107	83	49	0								39	98	377	377	377	Sm³
Generatore per ACS	23	21	23	19	18	18	18	18	17	18	22	23	238	238	238	238	Sm³
Usi cucina	8	7	9	8	8	9	9	8	7	7	8	8	97	97	97	97	Sm³
TOTALE FABBISOGNO	139	111	81	28	26	27	27	26	24	25	70	129	713	713	713	713	Sm³

Figura 3.6 – Dettaglio dei consumi di gas.

3.3 Modifiche per adattamento a piattaforma web

Il foglio di calcolo è stato inizialmente concepito per un funzionamento autonomo con immissione dei dati di input e con visualizzazione dei dati di output nel medesimo foglio (denominato INPUT).

La volontà attuale di utilizzare il foglio di calcolo come motore di una piattaforma web ha reso necessarie alcune modifiche che facilitassero l'interfacciamento con la piattaforma web.

Per questo motivo, è stata predisposta una nuova versione del foglio di calcolo nella quale sono stati aggiunti due fogli (Figura 3.7): un primo foglio, denominato DB_IN, è dedicato all'immissione dei dati di input in ingresso dalla piattaforma web; un secondo foglio, denominato DB_OUT, è dedicato alla raccolta degli output del calcolo per un invio alla piattaforma web che provvederà alla visualizzazione dei risultati.



Figura 3.7 – Nuova struttura del foglio di calcolo.

Complessivamente, nel foglio DB_IN si hanno 209 dati di input di tipo diverso (Array[Int]; Array[Stringa]; Float; Stringa; Int), mentre nel foglio DB_OUT si hanno 1.273 dati di output.

3.4 Predisposizione per collegamento con sito istituzionale ARERA

Tra i 209 dati di input che vengono inseriti nel foglio DB_IN, 21 servono al calcolo dei costi correnti dell’energia elettrica e del gas (14 input, 7 per utenti residenti e 7 per non residenti, per l’energia elettrica; 7 input per il gas), così come mostrato in Figura 3.8.

Il costo unitario dell’energia elettrica e del gas così calcolato viene confrontato con il costo dedotto dai dati immessi dall’utente per fornire suggerimenti circa i contratti di fornitura.

151	5,2	Costo elettricità res scaglione 10	Float
152	5,2	Costo elettricità res scaglione 1800	Float
153	5,2	Costo elettricità res scaglione 2640	Float
154	5,2	Costo elettricità res scaglione 4500	Float
155	5,2	Costo elettricità res scaglione 6750	Float
156	5,2	Costo elettricità res scaglione 9000	Float
157	5,2	Costo elettricità res scaglione 15000	Float
158	5,2	Costo elettricità nonres scaglione 10	Float
159	5,2	Costo elettricità nonres scaglione 1800	Float
160	5,2	Costo elettricità nonres scaglione 2640	Float
161	5,2	Costo elettricità nonres scaglione 4500	Float
162	5,2	Costo elettricità nonres scaglione 6750	Float
163	5,2	Costo elettricità nonres scaglione 9000	Float
164	5,2	Costo elettricità nonres scaglione 15000	Float
165	5,2	Costo gas scaglione 1	Float
166	5,2	Costo gas scaglione 120	Float
167	5,2	Costo gas scaglione 480	Float
168	5,2	Costo gas scaglione 1560	Float
169	5,2	Costo gas scaglione 5000	Float
170	5,2	Costo gas scaglione 80000	Float
171	5,2	Costo gas scaglione 80001	Float

Figura 3.8 – Input per calcolo costo unitario elettricità e gas.

Per tali input è attualmente previsto un aggiornamento manuale con cadenza mensile direttamente sul foglio di calcolo, avendo comunque ipotizzato la possibilità di un collegamento al sito istituzionale ARERA. Tale aggiornamento prevede l’interrogazione del sito web Portale Offerte (<https://www.ilportaleofferte.it/portaleOfferte/>) per le sette classi di consumo individuate per ciascuna delle tre tipologie contrattuali e la successiva compilazione manuale del foglio di calcolo, con un tempo di lavoro di circa 15 minuti.

Il collegamento al sito ARERA non è stato realizzato, in attesa di un rilascio definitivo e di una messa a regime definitiva della piattaforma web, che consentiranno di valutare in primo luogo l’impiego effettivo della piattaforma da parte degli utenti ed in secondo luogo l’effettiva necessità ed efficacia di un aggiornamento quotidiano dei costi dell’energia elettrica e del gas.

Per questo motivo, una volta rilasciata e pubblicizzata la piattaforma, sarà analizzato il comportamento degli utenti per capire quali siano tra le molteplici funzionalità del foglio di calcolo quelle più apprezzate e meglio comprese dall'utente (che potrebbe anche essere un utente non qualificato).

Una delle funzionalità aggiuntive del foglio di calcolo introdotte quest'anno prevede il calcolo degli investimenti necessari alla riqualificazione dell'abitazione e anche del tempo di ritorno dell'investimento. Tali investimenti e tali tempi di ritorno sono calcolati con costi correnti delle lavorazioni ipotizzate e con il costo corrente dell'energia elettrica e del gas.

L'aggiornamento dei costi delle lavorazioni si basa su indagini di mercato, dovendone necessariamente ricalcare la frequenza di aggiornamento, che non può in alcun modo essere giornaliera come quella dei costi dell'energia elettrica e del gas. Ciò comporta un disallineamento degli aggiornamenti che potrebbe portare a risultati di difficile lettura. Più esplicitamente, un utente che riprendesse un calcolo fatto solo qualche giorno prima si troverebbe a leggere risultati diversi, pur non cambiando i dati di input; tale circostanza, se non adeguatamente compresa, potrebbe minare la fiducia nei calcoli e allontanare l'utente dall'utilizzo della piattaforma web.

Per questi ragionamenti si è deciso di accantonare per il momento l'ipotesi di un collegamento automatico con sito istituzionale ARERA per l'aggiornamento dei costi dell'energia elettrica e del gas, rimandando lo stesso a successive valutazioni e facendo per il momento rientrare nelle normali operazioni di manutenzione della piattaforma web l'aggiornamento manuale.

Rimane presente e attivo il link di rimando al sito web Portale Offerte, nella sezione dedicata al confronto dei costi unitari (Figura 3.9).

6.3 CONTRATTI DI FORNITURA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DEL GAS

 In questa sezione sono analizzati i contratti di fornitura dell'energia elettrica e del gas, confrontando i costi unitari calcolati sulla base dei dati forniti dall'utente e i costi unitari ottenibili scegliendo il miglior contratto sul mercato libero dell'energia.

COSTI MEDI DI ACQUISTO DELL'ENERGIA			
 Costo medio energia elettrica [Euro/kWh]	0,17	0,21	Consigli sul contratto di fornitura elettrico: il contratto è molto competitivo.
 Costo medio del gas [Euro/Sm ³]	1,40	13,83	Consigli sul contratto di fornitura del gas: complimenti, il contratto è molto competitivo.



Figura 3.9 – Sezione 6.3 Contratti di fornitura dell'energia elettrica e del gas.

3.5 Piattaforma web di calcolo

Il foglio di calcolo è stato sviluppato in ambiente Excel e contiene macro scritte in VBA (Visual Basic for Applications).

Al fine di non dover riprogrammare l'intero strumento di calcolo, si è deciso di mantenere l'utilizzo del software Excel come motore di calcolo, delegando la fase di acquisizione degli input e presentazione degli output ad una piattaforma web. In questo modo è possibile fruire del servizio senza vincoli tecnologici legati a software proprietari, accentrando la raccolta dati in un singolo punto di persistenza.

La piattaforma web è stata sviluppata da altro gruppo di ricerca ed è accessibile all'indirizzo <https://www.smarthome.enea.it/smartsim/login> (Figura 3.10).

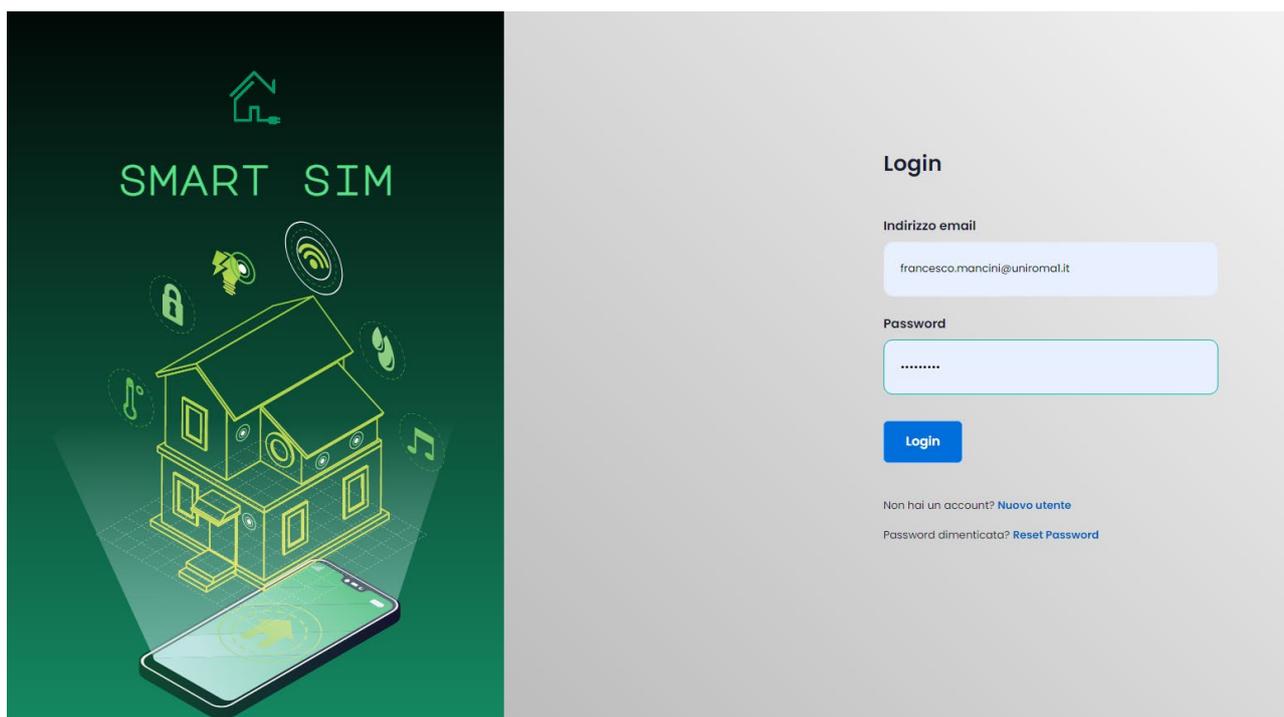


Figura 3.10 – Pagina di login della piattaforma web.

3.5.1 Struttura della piattaforma web

Dal punto di vista strutturale la piattaforma web è costituita da 3 entità principali:

- GUI (Graphic User Interface);
- Motore di calcolo Excel;
- Persistenza dati.

La GUI è l'entry point dell'utente, attraverso il quale, una volta effettuato l'accesso, è possibile inserire gli input necessari tramite un processo guidato e consultare il report una volta concluso il processo di calcolo.

Il motore di calcolo è un middleware che fa da interfacciamento tra i dati nel database ed il foglio di calcolo Excel, consentendo di automatizzare:

- l'inserimento degli input sul foglio di calcolo;
- l'esecuzione delle macro;
- la lettura delle celle di output.

Il processo è descritto in Figura 3.11, ove per scheda, si intende un'istanza di compilazione, anche parziale, dei fogli di calcolo Excel. Per ulteriori dettagli sulla struttura si rimanda al report Rds/PTR(2021)/003.

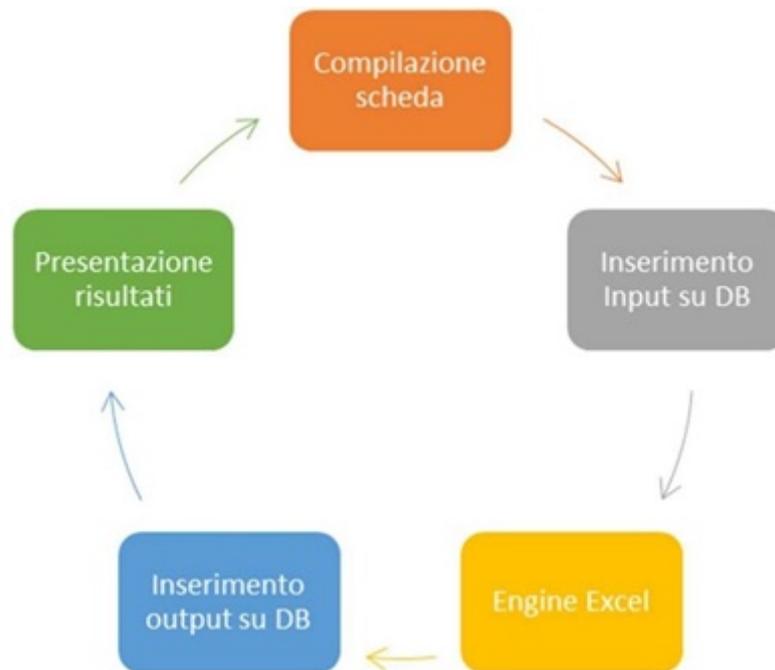


Figura 3.11 – Schema di processo della piattaforma web.

3.5.2 Funzionamento della piattaforma web

Il funzionamento della piattaforma web è riportato in Figura 3.12.

La successione delle attività prevede i seguenti step funzionali:

- Profilazione a 2 livelli (admin e user); è stato identificato uno scenario a due livelli di autenticazione per il caso d’uso specifico:
 - un profilo admin, in grado di accedere, modificare ed eliminare tutte le schede caricate;
 - un profilo user in grado di accedere, modificare ed eliminare solo le schede di cui è proprietario, ovvero quelle caricate con le proprie credenziali.
- Homepage: landing Page della Web Application in cui viene descritto sinteticamente il funzionamento dell’applicativo in termini di dati richiesti ed output attesi;
- Pagina login/registrazione; pagina attraverso cui effettuare il login/registrazione all’applicativo. In fase di registrazione è obbligatorio prendere visione dell’informativa ed inserire i dati minimi necessari;
- Sezione di gestione schede; in questa sezione è possibile gestire le schede presenti secondo le logiche di permessi precedentemente descritte nella profilazione. In particolare, è possibile:
 - accedere alla creazione di una nuova scheda;
 - accedere all’editing di una scheda esistente già compilata;
 - eseguire il processo di calcolo degli output di una scheda completata in tutti i suoi campi richiesti, ma non ancora calcolata;
 - accedere alla visualizzazione del report delle schede già calcolate.
- Sezione di creazione/editing di una scheda; questa sezione presenta una serie di sottosezioni che guidano l’utente, tramite un wizard, alla compilazione o modifica della scheda. Sono implementati controlli per evitare l’inserimento di valori non ammissibili per il motore di calcolo.

- Processo di calcolo; il processo di calcolo esegue la simulazione sulla base degli input forniti nel processo di inserimento dati tramite il wizard. Nel momento in cui l'utente richiede la simulazione su una specifica scheda, la GUI invia una richiesta al backend, il quale, dopo aver ricavato la scheda da simulare sul DB, avvia in maniera automatizzata il motore Excel, ed inserisce i campi relativi alla scheda selezionata. Una volta terminato il processo, i valori generati dal toolbox sono immagazzinati nel DB, e la scheda risulterà calcolata.
- Visualizzazione report; in questa sezione viene mostrato l'output precedentemente calcolato.

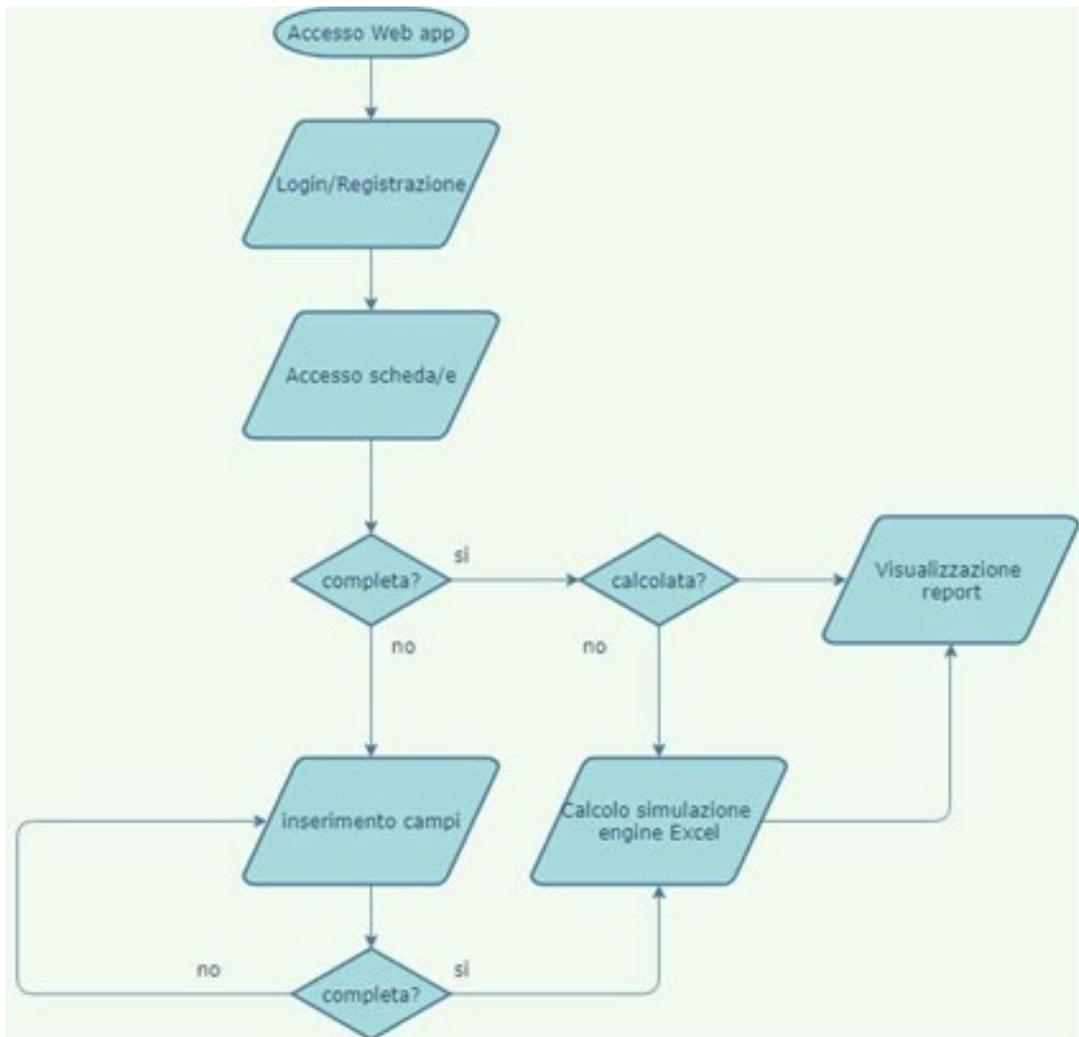


Figura 3.12 – Schema di funzionamento della piattaforma web.

Per ulteriori dettagli sul funzionamento della piattaforma si rimanda al report RdS/PTR(2021)/003.

3.6 Testing piattaforma web

La piattaforma web realizzata è stata sottoposta ad una campagna di testing volta a verificare il corretto funzionamento.

Una fase preliminare ha riguardato la revisione formale della piattaforma, finalizzata ad una corretta forma grafica e ad eliminare errori di battitura, o refusi di primo inserimento.

Successivamente, la prima fase del test è stata rivolta ad una verifica dell'inserimento dei dati di input. Il foglio di calcolo richiede l'immissione di 209 dati di input di tipo diverso (Array[Int]; Array[Stringa]; Float;

Stringa; Int); per alcuni input, è consentita un'immissione libera, per altri input, la scelta è vincolata alle opzioni proposte. Si è reso pertanto necessario verificare preliminarmente l'omogeneità formale dei dati che la piattaforma web invia al motore di calcolo Excel.

La seconda fase del test è stata dedicata alla verifica dei risultati del calcolo. Il foglio Excel restituisce 1.273 risultati di output; si è quindi proceduto alla compilazione parallela (per una serie di abitazioni campione) del foglio di calcolo e della piattaforma web con l'obiettivo di verificare la coincidenza dei risultati ottenuti.

L'ultima fase di test, con l'obiettivo di simulare il normale funzionamento della piattaforma web, è stata condotta grazie alla collaborazione di alcuni studenti della Facoltà di Architettura, ai quali è stato chiesto di procedere con l'utilizzo della piattaforma.

4 Analisi di scenari evolutivi – Il contributo potenziale del settore residenziale italiano in un'attività di Demand Response

L'attività di ricerca ha lo scopo di valutare il potenziale contributo del settore residenziale italiano ad un'attività di Demand Response basata sulla flessibilizzazione dei carichi elettrici.

Nel corso delle annualità precedenti di ricerca è stato costituito un ampio database sui consumi energetici delle abitazioni ed è stata condotta una campagna di misurazioni su 14 abitazioni selezionate.

Al fine di valutare complessivamente il contributo che tutte le abitazioni possono dare, a partire da un numero limitato di misurazioni, è stata definita una metodologia volta all'aggregazione dei dati, che consentisse di ottenere un cluster di abitazioni che fosse rappresentativo di tutto il database.

Successivamente i dati aggregati ottenuti sono stati utilizzati per:

1. definire una procedura per l'aggregazione virtuale delle utenze ed elaborare una strategia di flessibilità utile al sistema elettrico italiano [7];
2. valutare il reale potenziale di flessibilità che le abitazioni possono offrire, in funzione di vincoli imposti e in dipendenza delle necessità del sistema elettrico italiano [8];
3. definire una metodologia per individuare il dimensionamento ottimale di un impianto fotovoltaico con accumulo, finalizzata alla riduzione dei picchi di domanda elettrica [9].

4.1 *Come il settore residenziale italiano potrebbe contribuire alla flessibilità del carico nelle attività di Demand Response: una metodologia per l'aggregazione di utenze residenziali e lo sviluppo di una strategia di flessibilità*

4.1.1 Procedura di aggregazione delle utenze

Le attività di ricerca hanno portato a raccogliere un elevato numero di questionari per la caratterizzazione energetica delle utenze residenziali (al momento dello studio, i questionari raccolti erano 751).

Parallelamente su alcune abitazioni archetipo (da altro gruppo di ricerca) sono state condotte campagne di misurazioni volte ad acquisire dati reali sul comportamento e sul consumo degli occupanti. I risultati della campagna di misurazioni sono stati analizzati per definire una schedulazione dei consumi elettrici, individuando il profilo medio giornaliero relativamente ai 12 mesi dell'anno e relativamente alle tre tipologie di giorno individuate (feriale, prefestivo e festivo).

A partire dai dati raccolti e dai dati misurati, si è quindi proceduto alla ricostruzione di un aggregato virtuale delle 751 utenze, costruito utilizzando i 14 archetipi, secondo la procedura illustrata in Figura 4.1.

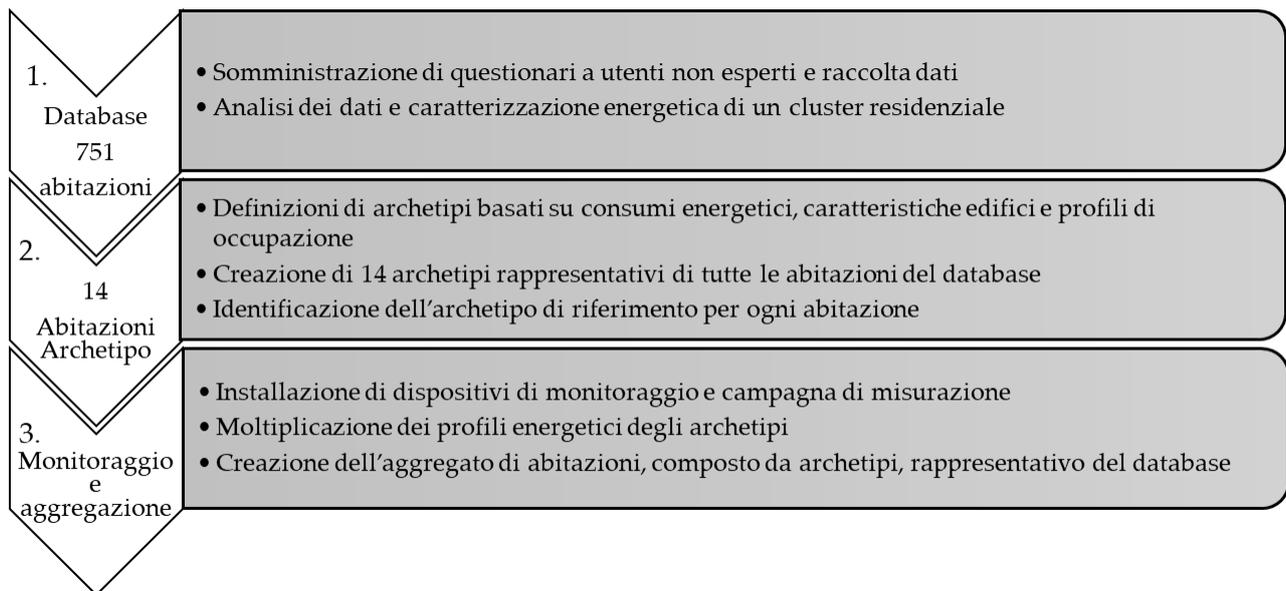


Figura 4.1 – Diagramma di flusso della procedura di aggregazione.

Per la modellizzazione di un aggregato di edifici, si ricorre spesso a modelli che combinano dati misurati e dati statistici; l'approccio basato su degli archetipi è ampiamente impiegato per considerare la diversità degli edifici; utilizzando questo approccio, la domanda di energia dell'aggregato (ED_{agg}) di energia può essere ottenuta moltiplicando la domanda di ogni archetipo (ED_i) per il numero di edifici da esso rappresentati (n_i).

$$ED_{agg} = \sum_i ED_i \cdot n_i \quad (4.1)$$

La definizione degli archetipi è stata effettuata considerando i seguenti aspetti caratterizzanti:

- i consumi di energia elettrica (carichi accumulabili, carichi differibili, carichi non differibili);
- la presenza di impianti di riscaldamento o di preparazione dell'acqua calda sanitaria ad alimentazione elettrica;
- la presenza di un impianto fotovoltaico;
- la dimensione dell'abitazione;
- il modello di occupazione (numero di occupanti, presenza nell'abitazione).

L'individuazione dell'archetipo di riferimento per ogni abitazione è stata effettuata utilizzando un confronto a punti, sulla base dei criteri riportati in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 – Aspetti caratterizzanti delle abitazioni e criteri per il calcolo del punteggio.

Aspetto caratterizzante (G)	Criterio	Punteggio max (Pmax)	Punteggio
Carichi accumulabili	Scostamento relativo	0,15	$(G/Gref) * Pmax$ or $(Gref/G) * Pmax$
Carichi differibili	Scostamento relativo	0,15	$(G/Gref) * Pmax$ or $(Gref/G) * Pmax$
Carichi non differibili	Scostamento relativo	0,15	$(G/Gref) * Pmax$ or $(Gref/G) * Pmax$
Riscaldamento o DHW	Vettore energetico	0,05	Elettrico = 0,05; Gas = 0
Impianto fotovoltaico	Presenza/assenza	0,05	Presente = 0,05; Assente = 0,00
Superficie abitazione	Scostamento relativo	0,10	$(G/Gref) * Pmax$ or $(Gref/G) * Pmax$
Numero di occupanti	Scostamento relativo	0,10	$(G/Gref) * Pmax$ or $(Gref/G) * Pmax$
Presenza in orario 8-13	presenza/assenza	0,10	Presente = 0,10; Assente = 0,00
Presenza in orario 13-19	presenza/assenza	0,10	Presente = 0,10; Assente = 0,00
Presenza in orario 19-0	presenza/assenza	0,025	Presente = 0,025; Assente = 0,00
Presenza in orario 0-8	presenza/assenza	0,025	Presente = 0,025; Assente = 0,00
TOTALE		1,00	

Pmax è il punteggio massimo assegnabile per l'aspetto tipizzante selezionato;

G è il valore numerico effettivo corrispondente all'aspetto tipizzante selezionato;

Gref è il valore numerico corrispondente all'aspetto tipizzante associato all'archetipo di riferimento utilizzato

4.1.2 Descrizione del database e degli archetipi

Come affermato in precedenza, questo studio si riferisce alle prime 751 abitazioni del database e utilizza una campagna di misurazioni condotta su 14 archetipi da altro gruppo di ricerca.

Al fine di inquadrare al meglio quanto di seguito esposto e di facilitarne la lettura conviene qui di seguito riportate sommariamente le caratteristiche delle 751 abitazioni e dei 14 archetipi.

La superficie media delle 751 abitazioni è pari a 120,4 m² (Figura 4.2a) e varia tra i valori minimo e massimo di 22,5 m² e 648,0 m², rispettivamente. Per quanto riguarda il numero degli occupanti, i limiti inferiore e superiore sono rispettivamente 1 e 9, mentre il valore medio è 3,4 (Figura 4.2b). In termini di composizione del nucleo familiare, risultano prevalenti i nuclei con 4 componenti (41,8%), mentre quelli con 3 e 2 componenti hanno una quota pari rispettivamente al 26,1% e al 17,8%.

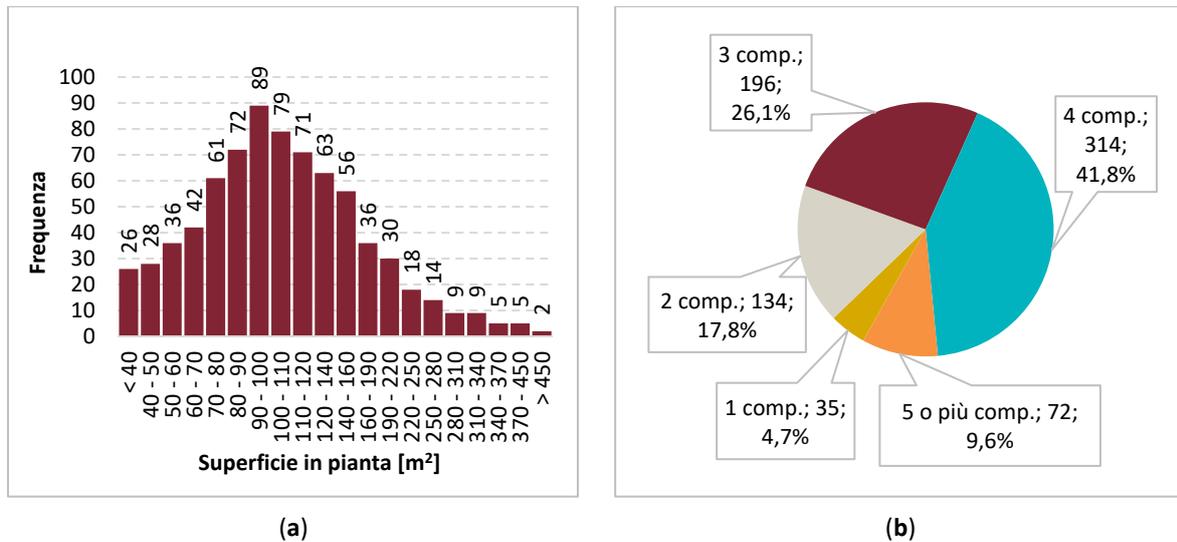


Figura 4.2 – Caratteristiche delle abitazioni. (a) Superficie in pianta; (b) Occupazione.

Tutte le abitazioni sono dotate di un impianto di riscaldamento (Figura 4.3a), che mostra una netta prevalenza di impianti a gas (98,5%), rispetto a quelli alimentati elettricamente (1,5%). Anche gli impianti di preparazione dell'acqua calda sanitaria sono presenti in tutte le abitazioni campione (Figura 4.3b), e sono costituiti principalmente da caldaie istantanee (77,5%), anziché da altre tipologie, come caldaia a condensazione con accumulo integrato (7,7%), scaldacqua elettrici (12,5%) e scaldacqua a pompa di calore (2,1%). In 385 abitazioni (51,3%) è presente almeno un condizionatore elettrico fisso e il numero medio di locali raffrescati è pari a 2,9.

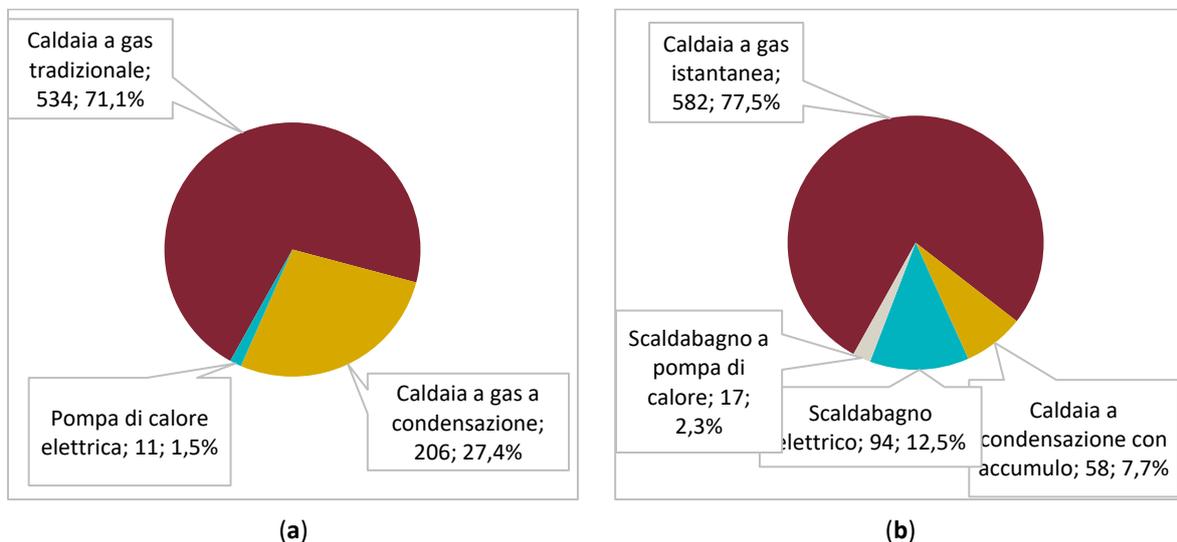


Figura 4.3 – Tipologia degli impianti. (a) Riscaldamento; (b) Preparazione acqua calda sanitaria.

All'interno del database delle 751 abitazioni sono stati individuati i 14 archetipi significativi, le cui caratteristiche salienti sono riassunte in Tabella 4.2.

Tutti gli archetipi sono dotati di una caldaia a gas (9 tradizionali e 5 a condensazione); gli apparecchi di raffreddamento sono installati solo in 9 archetipi e servono solo pochi ambienti; le lavatrici (WM) sono presenti in tutti gli archetipi con una media di 4 cicli settimanali; solo 11 archetipi sono dotati di lavastoviglie

(DW) con 5 cicli settimanali e solo 4 di loro hanno anche un'asciugatrice (TD). Gli impianti di illuminazione sono dotati per l'80% di lampade fluorescenti o LED e per il 20% di lampade a incandescenza o alogene.

Tabella 4.2 – Caratteristiche salienti degli archetipi.

Archetipo	Superficie in pianta [m ²]	Heating & DHW*	Cooling*	PV array	WM**	DW**	TD**
#01	49	NCB	2 HP		7; 5; A+	6; 7; A	
#02	101	NCB	1 HP		10; 2.5; A		
#03	100	NCB	1 HP		7; 5; A+		
#04	50	NCB	1 HP		7; 1.5; A+		5; 0.5; A
#05	100	CB + HP	4 HP		7; 4; A++	5; 4; A	5; 4; A
#06	65	CB	3 HP		7; 6; A	12; 3.5; A	7; 0.5; B
#07	65	NCB	1 HP		7; 5; A+	6; 7; A	
#08	60	CB			7; 2; A++	12; 1.5; A+	
#09	95	NCB	2 HP		7; 5; A+++	12; 8; A+	
#10	102	NCB	1 HP		7; 3; A+	14; 5; A	
#11	67	CB			10; 5; B	6; 5; B	
#12	134	CB			7; 6; A	14; 7; A	6; 3; B
#13	124	CB			5; 4; A	12; 7; A+	
#14	123	NCB + solar collectors		3.9 kW	5; 4; A	12; 7; A+	

* Heating & DHW (riscaldamento e prep. acqua calda sanitaria); Cooling (raffrescamento) NCB: Non-Condensing Boiler (caldaia a gas tradizionale); CB: Condensing Boiler (caldaia a gas a condensazione); HP: Heat Pump (pompa di calore)

** WM Lavatrice; DW lavastoviglie; TD Asciugatrice; Capacità, cicli settimanali, Classe energetica.

La Tabella 4.3 riporta, relativamente ai 14 archetipi, la composizione della famiglia e le modalità di occupazione dell'abitazione.

Tabella 4.3 – Composizione delle famiglie e occupazione dell'abitazione per i 14 archetipi.

Archetipo	Occupanti*	Descrizione
#01	4; (1; 3; 4; 4)	Famiglia con due figli adolescenti e un genitore disoccupato
#02	2; (0; 0; 2; 2)	Lavoratori pendolari
#03	4; (0; 3; 4; 4)	Famiglia con figli in età scolare e un genitore che lavora part-time
#04	1; (0; 0; 1; 1)	Lavoratore pendolare
#05	4; (1; 3; 4; 4)	Famiglia con figli in età scolare e un genitore a casa
#06	4; (1; 3; 4; 4)	Famiglia con figli in età scolare e neonati, e un genitore disoccupato
#07	3; (0; 0; 3; 3)	Famiglia con un bambino e genitori pendolari
#08	2; (1; 1; 2; 2)	Lavoratore pendolare, in attesa di occupazione
#09	3; (1; 2; 3; 3)	Famiglia con un figlio in età scolare e un lavoratore pendolare
#10	2; (0; 1; 2; 2)	Famiglia di lavoratori pendolari
#11	3; (0; 2; 3; 3)	Famiglia con un figlio in età scolare e due lavoratori pendolari
#12	4; (0; 1; 4; 4)	Famiglia con due figli adulti e due genitori pendolari
#13	2; (0; 1; 2; 2)	Famiglia con un figlio in età scolare e due lavoratori pendolari
#14	2; (2; 2; 2; 2)	Due pensionati

* Numero di occupanti; (8 a.m. ÷ 1 p.m.; 1 p.m. ÷ 7 p.m.; 7 p.m. ÷ 12 p.m.; 12 p.m. ÷ 8 a.m.).

All'interno delle abitazioni selezionate è stata effettuata l'installazione di un kit di sensori e attuatori wireless per il monitoraggio dei consumi, del confort indoor e per il controllo di alcune utenze termiche ed elettriche (Figura 4.4).

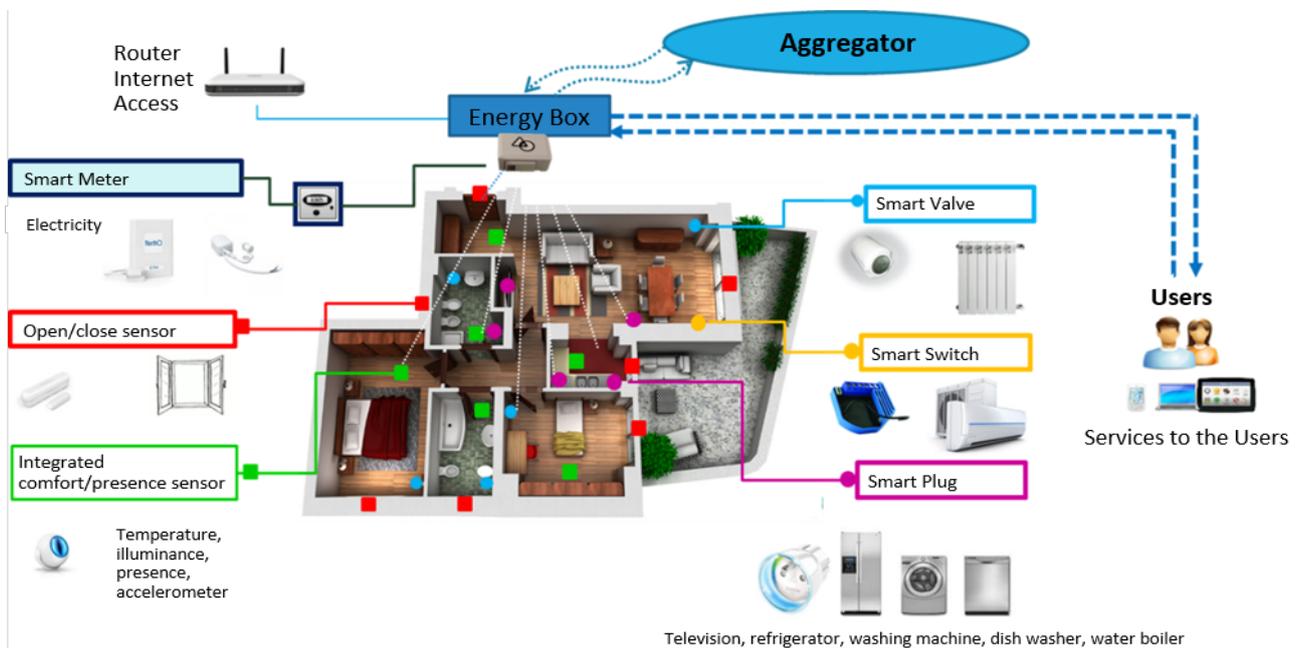


Figura 4.4 – Layout del sistema di monitoraggio.

Il numero di sensori installato è stato deciso in base alla dimensione delle abitazioni e alla tipologia degli elettrodomestici, come riportato in Tabella 4.4. Tutti i sensori adottano il protocollo di comunicazione Z-Wave per interagire con l'Energy Box (EB). Quest'ultimo ha la funzione di gestire le periferiche ed è in grado di scambiare dati con terze parti (come le utility) tramite la connessione internet. E' presente un misuratore generale per i consumi elettrici di tutta l'abitazione, mentre le Smart Plug supervisionano elettrodomestici come frigoriferi, lavatrici e altri dispositivi elettrici. Infine, gli Smart Switch controllano la preparazione dell'acqua calda sanitaria e, dove sono installati, anche le pompe di calore elettriche, per la climatizzazione.

Il tempo di campionamento dell'energy box per la raccolta dei dati elettrici è di 5 secondi; i dati sono poi post-elaborati per calcolare valori medi in 15 minuti.

Tabella 4.4 – Configurazione del kit di monitoraggio per i 14 archetipi.

Funzione	Device	#01	#02	#03	#04	#05	#06	#07	#08	#09	#10	#11	#12	#13	#14
Energy box	Gateway	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Monitoraggio	Electricity meters	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2
	Multi-sensore (temperatura, presenza, illuminamento)	5	6	6	4	6	6	4	4	7	6	3	9	7	7
	Sensori apertura porte/finestre	7	8	6	5	8	8	5	5	10	10	6	9	12	9
Controllo	Smart Valves	6	5	0	4	3	6	5	3	8	6	0	0	7	0
	Smart Plugs	4	3	4	4	3	4	4	3	3	4	3	5	3	6
	Smart Switches	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0

4.1.3 Profili di consumo giornaliero per i 14 archetipi

In questo paragrafo sono riportati i risultati delle elaborazioni sui dati di consumo delle utenze campione/archetipo effettuate per individuare i profili medi annuali per ogni singola utenza.

A partire dai dati della campagna di monitoraggio relativa agli anni 2018 e 2019, sono stati ricavati gli andamenti giornalieri medi della potenza elettrica assorbita per ognuna delle utenze, relativamente alle tre tipologie di giorno della settimana (feriale, prefestivo e festivo).

In Figura 4.5 è riportato il profilo giornaliero delle 14 utenze per il giorno feriale. Si osserva un andamento analogo tra le diverse utenze, con un primo picco (di lieve entità) nelle prime ore della mattina (tra le 6 e le 8) ed un secondo picco (molto più marcato), verso sera (tra le 19 e le 22); questo andamento è in correlazione con i periodi della giornata in cui si registra maggior presenza degli utenti all'interno delle abitazioni, generalmente prima e dopo il rientro dalle attività esterne diurne; per le utenze (#11; #14) caratterizzate da una presenza continuativa all'interno dell'abitazione, si osserva un ulteriore piccolo picco intorno nelle ore centrali della giornata (tra le 13 e le 15).

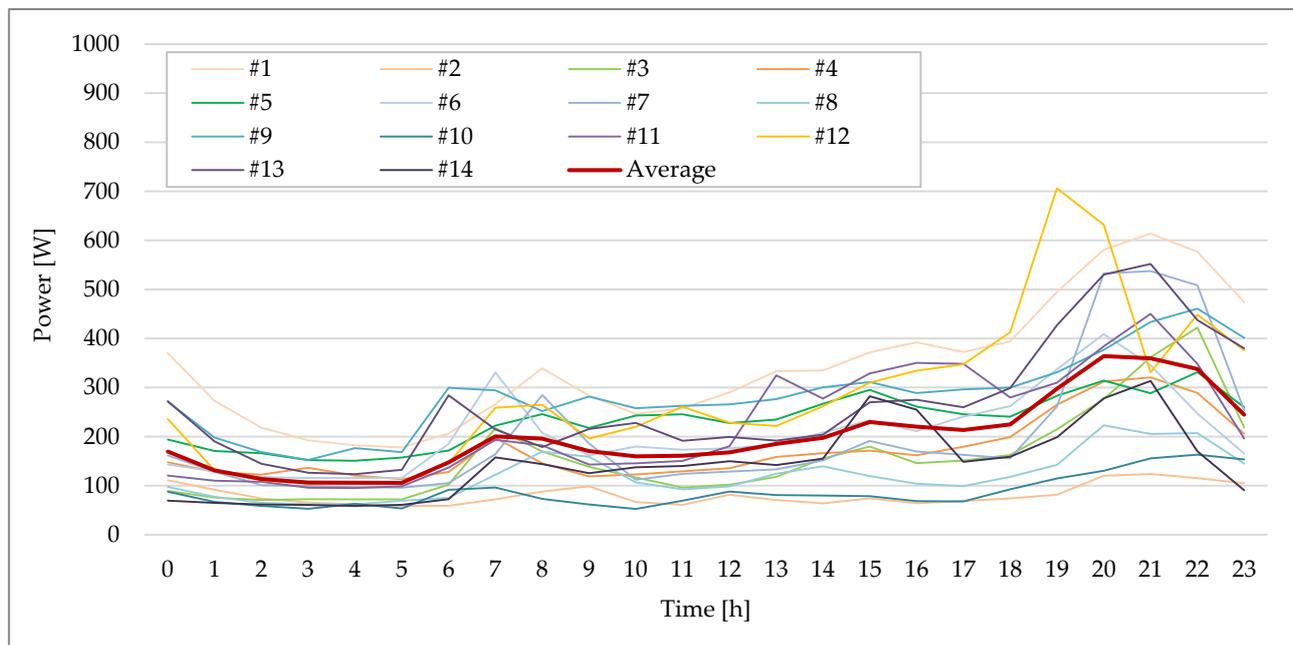


Figura 4.5 – Profilo giornaliero medio utenze campione (archetipo) nei giorni feriali.

In Figura 4.6 è riportato il profilo giornaliero delle 14 utenze per il giorno semifestivo. In questi giorni, in conseguenza di una presenza più continuata degli utenti all'interno delle abitazioni, si osservano andamenti leggermente diversi rispetto a quelli osservati per i giorni feriali: (i) il picco mattutino è di maggiore entità ed è traslato in avanti di due ore circa; (ii) il picco nelle ore centrali della giornata ha una maggiore rilevanza; (iii) la potenza media è in generale più alta, in conseguenza di una maggiore attività all'interno delle abitazioni (pulizia, lavaggio, ecc.); (iv) si hanno differenze più ampie tra i profili delle diverse abitazioni.

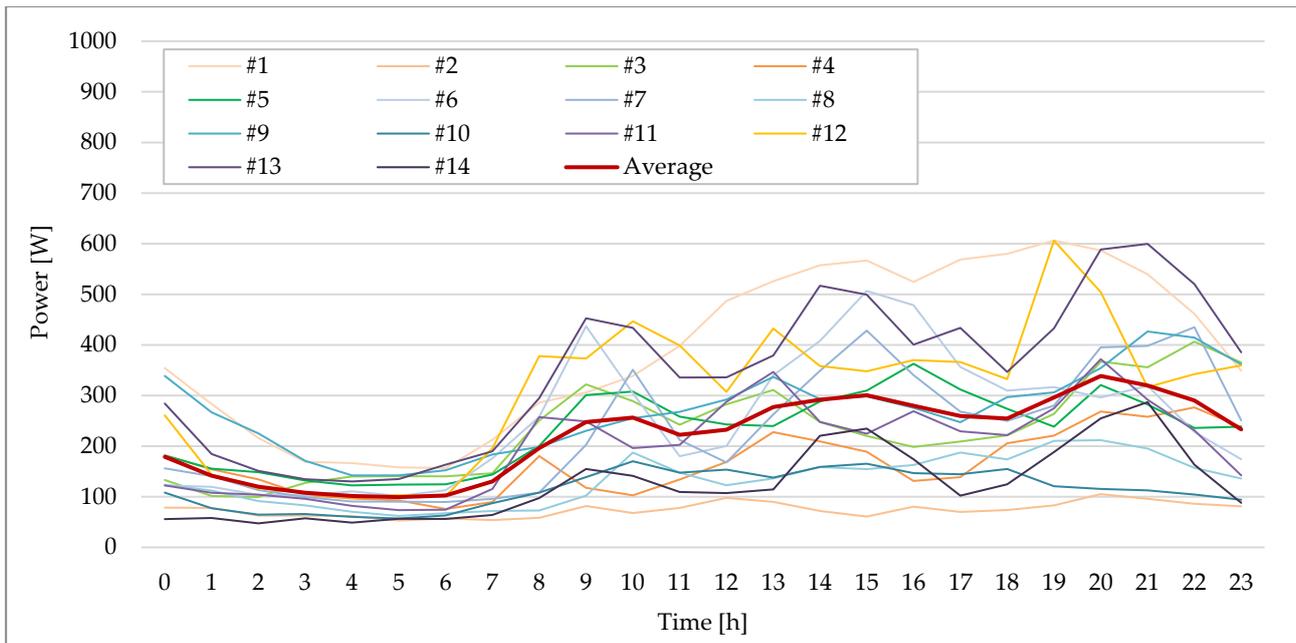


Figura 4.6 – Profilo giornaliero medio utenze campione (archetipo) nei giorni prefestivi.

In Figura 4.7 è riportato il profilo giornaliero delle 14 utenze per il giorno festivo. Si osservano i seguenti elementi caratteristici: (i) in analogia con i giorni prefestivi, l’inizio delle giornate degli utenti è posticipato (8 ÷ 10 a.m.); (ii) a differenza dei giorni feriali e semifestivi, in conseguenza di una presenza quasi costante degli utenti nelle abitazioni, la potenza media rimane pressoché costante dalla mattina al tardo pomeriggio; (iii) il picco serale è di intensità maggiore rispetto agli altri giorni; (iv) si hanno ampie differenze più ampie tra i profili delle diverse abitazioni.

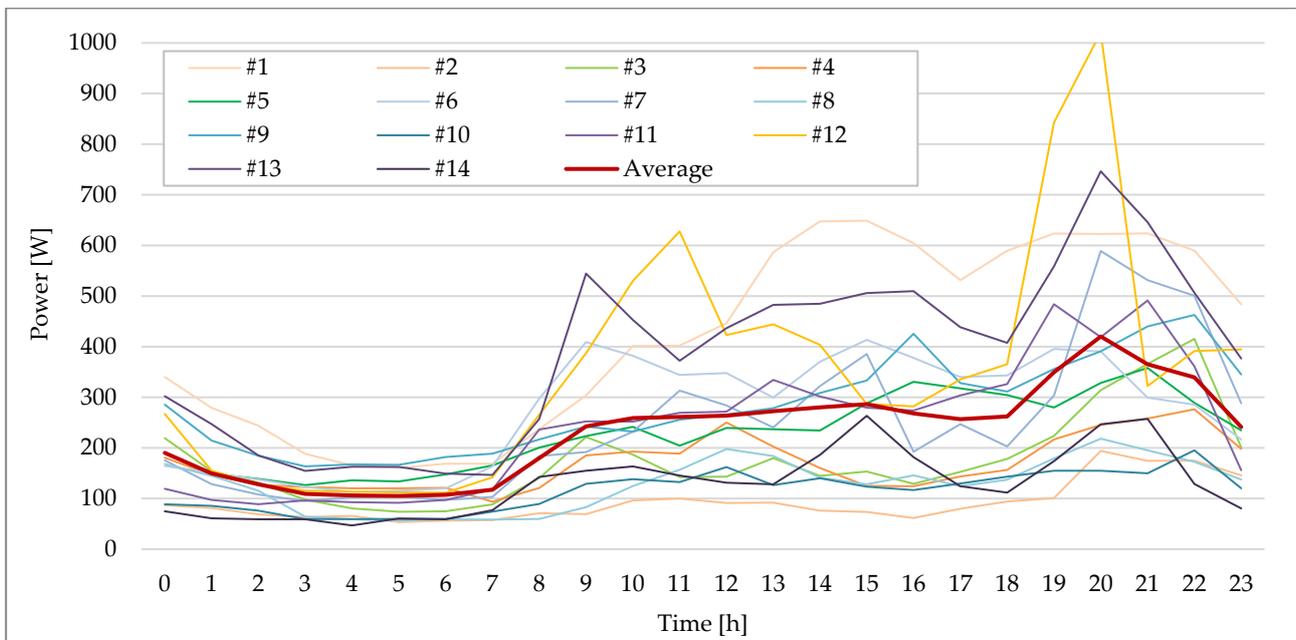


Figura 4.7 – Profilo giornaliero medio utenze campione (archetipo) nei giorni festivi.

4.1.4 Aggregazione virtuale delle utenze

Avendo individuato i profili di consumo delle 14 utenze archetipo, si è quindi proceduto all’aggregazione dei consumi al fine di individuare il profilo di consumo dell’aggregato virtuale delle 751 abitazioni.

Il confronto a punti è stato condotto utilizzando i criteri descritti in precedenza (Tabella 4.1) e considerando che per i 14 archetipi le grandezze di riferimento assumono i valori indicati in Tabella 4.5.

Tabella 4.5 – Parametri di riferimento degli archetipi.

Parametri	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
Carichi accumulabili [kWh]	191	106	111	165	950	213	112	49	181	110	46	92	122	81
Carichi differibili [kWh]	667	188	549	190	808	714	549	139	915	618	820	1.274	835	556
Carichi non differibili [kWh]	2.648	1.024	1.085	879	1.298	1.000	1.099	881	2.384	1.218	1.049	1.754	1.439	959
Preparaz. ACS a gas=0; elettrico =1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Presenza/assenza Imp. Fotovolt.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Superficie abitazione [m ²]	49	101	66	50	100	50	66	60	94	102	67	134	137	110
Numero occupanti [-]	4	2	3	1	4	4	2	2	3	2	3	4	3	2
Presenza/assenza in orario 8-13	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1
Presenza/assenza in orario 13-19	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Presenza/assenza in orario 19-0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Presenza/assenza in orario 0-8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Avendo effettuato il confronto tra ognuna delle 751 abitazioni del database e le 14 abitazioni monitorate, per ognuna è stato selezionato il miglior confronto, ovvero il confronto con il punteggio più alto. La Figura 4.8 mostra i risultati della selezione effettuata, riportando per ognuna delle 14 abitazioni solo i casi di miglior confronto (Best Fitting); mediamente, il miglior confronto ha un punteggio pari a 0,811.

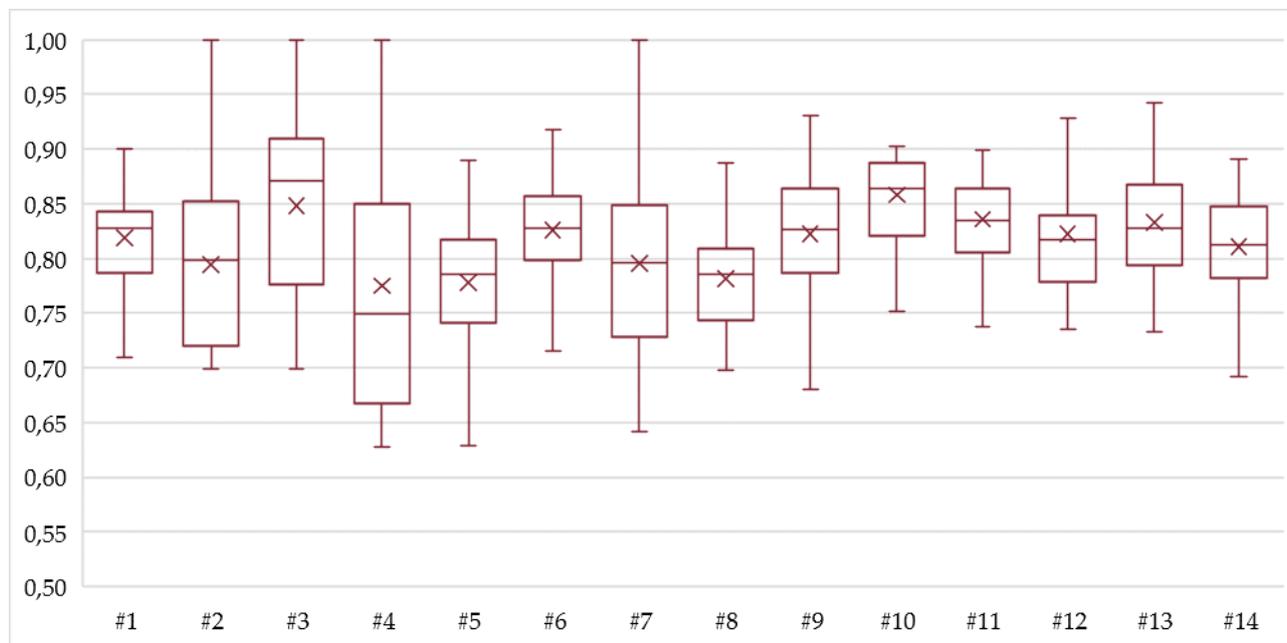


Figura 4.8 – Risultati della procedura di Best Fitting per le 751 abitazioni.

Si è quindi proceduto a valutare la rappresentatività di ognuna delle 14 abitazioni. La Tabella 4.6 riporta i risultati dell’elaborazione effettuata, indicando per ognuna delle abitazioni monitorate la rappresentatività in termini assoluti e in termini percentuali, relativamente al numero di abitazioni, alla superficie delle

abitazioni, agli occupanti, ai consumi elettrici totali, ai consumi elettrici accumulabili e ai consumi elettrici differibili.

Tabella 4.6 – Rappresentatività degli archetipi.

Archetipo	Numero abitazioni	Superficie [m ²]	Occupanti	Consumi elettrici [kWh/y]	Carichi accumulabili [kWh/y]	Carichi differibili [kWh/y]
#01	31 (4,1%)	4.782 (5,2%)	130 (5,1%)	95.963 (6,7%)	5.310 (1,6%)	18.081 (8,4%)
#02	16 (2,1%)	1.213 (1,3%)	36 (1,4%)	94.444 (6,6%)	5.894 (1,8%)	17.602 (8,2%)
#03	18 (2,3%)	1.575 (1,7%)	54 (2,1%)	95.718 (6,7%)	10.267 (3,1%)	17,113 (8%)
#04	14 (1,8%)	945 (1,0%)	18 (0,7%)	91.964 (6,4%)	7.479 (2,2%)	16.595 (7,7%)
#05	102 (13,5%)	1.2419 (13,7%)	369 (14,5%)	262.070 (18,3%)	178.992 (54,8%)	16.305 (7,6%)
#06	138 (18,3%)	18.056 (19,9%)	531 (20,9%)	110.935 (7,7%)	28.897 (8,8%)	16.048 (7,5%)
#07	14 (1,8%)	1.186 (1,3%)	31 (1,2%)	83.364 (5,8%)	2.507 (0,7%)	15.830 (7,4%)
#08	83 (11%)	5.409 (5,9%)	194 (7,6%)	100.642 (7,0%)	21.062 (6,4%)	15467 (7,2%)
#09	165 (21,9%)	23.820 (26,3%)	630 (24,8%)	108.939 (7,6%)	32.710 (10%)	14.186 (6,6%)
#10	16 (2,1%)	1.631 (1,8%)	37 (1,4%)	77.844 (5,4%)	3.320 (1,0%)	13.760 (6,4%)
#11	22 (2,9%)	1.822 (2%)	69 (2,7%)	71.965 (5%)	1.142 (0,3%)	13.468 (6,3%)
#12	33 (4,3%)	4.592 (5%)	135 (5,3%)	73.460 (5,1%)	4.563 (1,3%)	12.892 (6%)
#13	32 (4,2%)	4.975 (5,5%)	115 (4,5%)	76.550 (5,3%)	7.890 (2,4%)	12.813 (6%)
#14	67 (8,9%)	7.923 (8,7%)	189 (7,4%)	84.345 (5,9%)	16.070 (4,9%)	12.686 (5,9%)
Aggregato	751 (100%)	90.355 (100%)	2.538 (100%)	1.428.203 (100%)	326.103 (100%)	212.846 (100%)

Considerando il numero di ricorrenze delle 14 abitazioni, sono state quindi costruiti i profili di carico dell'aggregato per il giorno medio feriale, semifestivo e festivo, relativamente ai 12 mesi dell'anno.

Tali profili di carico sono riportati nelle tabelle seguenti, con un'indicazione numerica e con una colorazione intuitiva indicativa dell'entità del consumo. Per semplicità di lettura, i valori numerici riportati si riferiscono al valore medio della potenza oraria, espresso in Watt, ottenuto dividendo il valore aggregato per il numero delle abitazioni (751).

Relativamente ai giorni feriali (Tabella 4.7), si osserva che il profilo aggregato segue sommariamente l'andamento medio dei singoli archetipi, con un picco mattutino di lieve entità intorno alle 8 e un picco molto più pronunciato e distribuito nel tempo la sera dopo le 20. Nei mesi estivi (giugno, luglio e agosto), si osservano valori più alti della potenza media oraria, in conseguenza dell'accensione dei condizionatori.

Tabella 4.7 – Profilo di consumo aggregato – Giorni feriali.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	179	126	113	100	101	114	164	270	279	209	208	210	218	229	220	240	213	230	257	364	441	407	412	268
Febbraio	201	162	133	140	139	153	298	330	273	208	246	241	225	228	221	308	254	259	307	387	446	454	434	311
Marzo	177	143	124	121	141	126	264	323	232	202	203	193	166	187	214	235	242	205	258	358	458	405	389	271
Aprile	217	169	137	131	142	136	214	268	258	233	228	212	208	224	249	265	249	277	268	373	505	455	427	281
Maggio	172	134	121	112	122	123	203	260	227	200	179	182	204	227	233	239	222	210	232	299	367	376	354	254
Giugno	208	164	138	123	132	131	155	221	203	214	204	210	211	234	286	287	264	234	257	297	382	377	346	288
Luglio	217	182	166	150	147	150	155	198	193	183	172	166	190	223	265	300	288	292	300	304	311	328	318	252
Agosto	257	234	194	187	182	180	189	195	219	216	217	226	254	298	333	347	346	327	312	306	325	330	318	286
Settembre	200	148	137	126	122	122	161	241	203	224	204	208	199	211	261	274	244	217	233	320	399	409	369	296
Ottobre	180	150	145	130	134	133	199	309	254	243	219	214	222	210	223	269	271	233	230	310	384	351	332	276
Novembre	223	169	147	126	134	134	226	304	255	229	227	250	232	235	243	309	298	289	286	376	445	463	417	336
Dicembre	207	149	134	128	132	121	211	269	255	259	258	234	244	244	261	325	293	332	340	413	479	454	388	317

Relativamente ai giorni semifestivi (Tabella 4.8), si osserva una maggiore variabilità della potenza media oraria, a partire dalle ultime ore della mattinata fino a fine giornata, in conseguenza della variabilità dei

comportamenti già individuata per i 14 archetipi. I picchi pomeridiano e serale hanno una collocazione oraria diverse, per i diversi mesi dell'anno.

Tabella 4.8 – Profilo di consumo aggregato – Giorni semifestivi.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	208	133	110	108	113	104	114	133	252	305	356	264	210	330	371	315	275	290	338	445	427	451	331	256
Febbraio	205	158	125	111	104	104	107	156	215	351	347	233	306	404	433	479	490	329	389	335	441	462	390	302
Marzo	187	157	128	119	125	133	134	184	283	401	389	277	300	387	353	398	364	240	286	408	414	477	410	316
Aprile	188	139	110	104	100	96	125	138	207	400	366	246	268	279	303	423	256	196	214	360	474	372	322	330
Maggio	250	211	182	140	114	113	110	167	178	270	253	209	293	385	284	277	268	285	338	285	291	384	298	232
Giugno	197	160	134	122	115	113	150	194	201	262	239	231	251	303	294	274	295	275	313	323	382	399	303	234
Luglio	194	170	166	139	126	135	137	153	175	347	277	198	218	219	319	462	378	365	254	209	183	185	184	229
Agosto	230	208	190	181	154	140	148	154	183	211	228	231	212	269	330	377	306	273	216	233	271	249	286	245
Settembre	225	189	135	123	128	137	125	138	207	264	301	365	307	355	288	274	358	284	303	315	387	366	301	276
Ottobre	243	166	135	141	134	119	113	169	258	266	236	238	262	256	280	234	350	270	248	346	300	314	291	250
Novembre	263	228	238	167	130	122	117	158	257	309	281	241	224	317	399	428	373	411	337	310	360	338	331	252
Dicembre	215	223	172	144	126	123	142	205	260	321	371	264	239	295	392	437	444	403	345	474	527	469	382	315

Relativamente ai giorni festivi (Tabella 4.9), il picco serale torna ad essere quello più significativo; nei mesi estivi e a febbraio e a marzo, si osservano alti valori della potenza media oraria anche nelle ore pomeridiane.

Tabella 4.9 – Profilo di consumo aggregato – Giorni festivi.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	199	189	171	138	125	123	110	131	200	297	313	302	361	340	323	291	356	345	321	448	575	514	478	287
Febbraio	255	183	170	114	119	117	115	149	247	255	302	380	362	310	365	475	502	295	299	439	422	434	426	258
Marzo	299	213	157	125	118	122	118	132	244	404	356	253	212	217	303	370	462	223	237	382	382	350	353	273
Aprile	252	168	151	110	102	97	118	131	248	383	345	399	321	256	255	252	272	294	335	533	508	401	362	275
Maggio	166	145	124	106	113	114	119	130	177	236	267	259	277	285	315	291	308	256	228	289	406	376	373	266
Giugno	204	153	149	149	150	151	160	190	207	225	260	247	249	325	321	356	308	252	262	354	419	364	403	314
Luglio	226	200	156	131	133	134	137	149	203	223	185	192	179	240	279	289	300	320	261	203	266	225	219	195
Agosto	201	191	163	138	149	151	152	146	164	186	193	231	228	258	354	376	367	355	283	257	253	284	276	262
Settembre	230	179	150	127	126	132	136	153	214	276	258	253	313	333	369	377	337	288	372	383	463	379	280	226
Ottobre	227	160	139	143	107	105	116	152	233	253	274	260	262	278	312	368	252	242	268	360	359	327	278	192
Novembre	256	195	171	177	178	172	188	200	255	346	368	358	353	400	387	398	394	368	422	480	617	520	464	375
Dicembre	206	173	157	135	135	134	140	155	275	335	362	341	379	300	309	345	405	398	405	472	520	490	444	319

4.1.5 Andamento dei prezzi dell'energia nel mercato italiano

Utilizzando i dati disponibili sul sito internet del GME (Gestore dei Mercati Energetici, <https://www.mercatoelettrico.org/It/Default.aspx>) è stato analizzato l'andamento del PUN (Prezzo Unico Nazionale) negli anni 2018 e 2019, con la stessa suddivisione temporale impiegata per i profili di consumo.

I risultati delle analisi sono riportati nelle tabelle seguenti, con le stesse modalità di colorazione viste in precedenza; l'indicazione numerica si riferisce al valore del PUN [€/MWh] ottenuto mediando i valori dei due anni considerati.

Relativamente ai giorni feriali (Tabella 4.10), si osserva un andamento caratterizzato da due intervalli giornalieri con prezzi bassi e da due intervalli giornalieri di prezzo alto: (i) il primo intervallo di prezzo basso si ha nelle ore notturne (from 12 p.m. to 6 a.m), in conseguenza della bassa domanda di energia elettrica; (ii) il secondo intervallo di prezzo basso si ha nelle prime ore pomeridiane (from 1 p.m to 2 p.m) e si verifica principalmente per effetto della produzione fotovoltaica; (iii) il primo intervallo di prezzo alto si ha nelle ore mattutine di inizio attività (from 8 a.m. to 11 a.m.); (iv) il secondo intervallo di prezzo alto si ha nelle ore serali successive al tramonto, con una collocazione anche influenzata dall'introduzione estiva dell'ora legale.

Tabella 4.10 – Andamento PUN giorno medio mensile – Giorni feriali.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	50,3	46,5	43,7	42,8	43,6	47,8	56,9	64,2	71,4	70,1	65,5	62,9	59,4	58,6	60,9	63,9	67,8	74,6	74,3	71,7	65,9	61,6	58,1	53,4
Febbraio	50,4	48,1	45,9	45,4	45,8	49,3	59,3	65,4	72,2	68,1	62,0	59,2	55,2	54,2	57,6	59,7	64,5	70,5	77,4	75,5	67,4	62,2	58,1	53,4
Marzo	48,1	45,3	43,2	42,1	42,7	46,9	56,8	63,1	68,8	64,7	59,0	55,7	50,0	49,7	53,3	57,2	60,8	64,0	72,9	79,7	70,7	62,6	56,5	50,9
Aprile	48,6	44,3	41,9	41,1	41,5	46,1	54,2	62,4	70,4	65,1	59,4	55,9	49,2	47,8	51,4	53,9	55,9	55,3	57,7	65,7	70,7	61,7	55,0	49,8
Maggio	49,9	45,6	42,3	41,0	41,3	45,7	53,2	60,9	66,4	62,4	58,5	55,6	50,7	49,8	52,3	54,2	56,1	56,0	57,9	63,0	67,0	63,4	56,5	50,0
Giugno	52,7	49,8	46,1	44,4	44,1	44,6	52,8	58,1	65,1	62,1	58,8	57,0	52,4	52,0	55,5	57,1	59,5	59,8	60,9	65,2	66,0	64,3	58,6	52,0
Luglio	57,6	54,4	51,5	50,0	49,6	50,5	54,9	59,0	63,9	64,0	62,0	60,8	56,9	56,9	60,2	62,2	64,6	65,5	66,6	69,1	68,9	68,7	63,9	58,6
Agosto	60,3	56,0	53,1	51,8	51,4	52,9	55,9	58,2	61,7	61,3	59,0	58,2	56,3	56,2	58,0	59,6	62,4	66,0	69,2	72,3	74,2	70,9	65,6	60,6
Settembre	58,8	56,5	54,8	54,0	54,0	56,7	64,9	69,8	77,1	75,1	70,1	67,1	61,0	61,1	65,9	70,3	73,9	74,2	75,5	85,5	81,2	71,8	65,4	59,7
Ottobre	54,9	52,8	50,9	50,4	50,7	54,3	65,6	73,8	78,6	76,0	70,4	67,8	61,5	61,3	65,2	69,0	72,5	73,6	79,0	84,9	75,7	68,3	62,8	56,9
Novembre	50,1	46,5	44,4	42,5	42,7	46,4	56,8	64,5	68,4	67,1	64,3	63,3	60,0	60,6	62,7	65,2	69,9	78,8	78,0	72,1	65,0	59,9	56,6	52,6
Dicembre	48,8	44,9	42,6	40,9	41,3	45,7	54,8	61,4	65,4	64,8	61,8	60,4	57,7	57,5	59,9	63,5	67,8	74,0	69,5	66,8	62,7	58,8	55,7	50,9

Relativamente ai giorni semifestivi (Tabella 4.11), si conferma l'andamento caratterizzato da due intervalli di prezzo basso e da due intervalli di prezzo alto; rispetto ai giorni feriali, l'intervallo di notturno con prezzi bassi è meno esteso, mentre si allarga l'intervallo pomeridiano. Con eccezione dei mesi invernali e soprattutto nei mesi estivi, l'intervallo notturno caratterizzato da prezzi alti ha una maggiore estensione (from 7 p.m. to 1 a.m.).

Tabella 4.11 – Andamento PUN giorno medio mensile – Giorni semifestivi.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	55,3	52,0	49,2	47,8	46,8	47,1	53,3	59,5	63,5	63,7	59,7	56,5	54,5	52,1	52,2	55,5	60,0	69,5	72,7	72,0	66,8	63,1	58,3	53,5
Febbraio	52,1	49,9	47,5	46,2	45,8	46,9	52,9	58,8	60,8	62,0	57,5	53,8	49,9	46,7	46,7	48,8	52,9	61,6	72,0	72,2	65,4	59,5	53,7	49,2
Marzo	54,9	49,1	46,3	44,9	44,1	46,4	50,4	53,7	55,2	54,8	51,7	47,1	42,9	39,3	38,9	42,4	46,2	53,2	64,2	71,4	65,3	57,7	53,2	47,3
Aprile	52,0	47,7	44,9	44,6	44,1	45,5	48,7	54,1	57,9	56,2	51,4	46,4	40,4	32,3	31,3	36,6	43,7	47,9	52,9	60,2	66,2	59,0	53,4	47,5
Maggio	55,5	50,4	46,4	45,0	44,5	45,7	45,9	52,8	56,1	56,1	55,0	51,6	46,7	41,8	41,1	43,7	48,3	48,4	51,0	57,9	63,1	60,0	53,4	47,3
Giugno	58,2	54,5	49,7	47,2	46,2	43,8	45,1	48,2	51,9	52,3	49,2	43,5	39,2	35,3	34,1	36,3	39,8	46,5	51,9	56,9	59,6	59,3	54,1	50,7
Luglio	61,3	58,4	54,4	53,6	52,2	50,6	50,0	53,0	55,2	54,8	52,1	49,6	47,0	46,2	45,2	46,4	48,9	53,4	58,1	62,4	63,6	63,8	59,2	54,5
Agosto	62,2	58,4	55,5	53,8	53,1	53,1	52,3	53,0	54,5	53,9	51,2	50,1	50,8	48,6	48,2	49,1	51,0	54,1	60,2	66,9	70,2	67,9	61,7	57,4
Settembre	63,2	62,1	58,5	56,1	55,7	56,2	60,5	62,3	61,8	61,1	57,1	54,1	51,3	48,7	47,9	49,4	52,5	58,2	63,4	73,2	72,4	64,7	60,7	55,6
Ottobre	61,7	59,7	56,2	54,6	53,7	55,4	62,9	68,2	67,5	65,7	59,8	55,2	52,5	49,1	48,2	49,6	53,1	59,2	70,8	78,4	73,3	65,0	57,3	55,2
Novembre	53,3	49,4	46,8	45,0	43,6	46,8	51,3	54,7	56,7	57,4	56,9	56,5	54,3	52,3	51,6	53,9	57,6	64,8	66,2	66,0	60,6	56,1	53,5	51,0
Dicembre	51,4	46,6	42,8	41,4	40,8	41,7	47,2	52,7	55,7	55,4	54,0	52,3	51,5	49,5	50,5	52,8	57,0	62,6	62,8	62,7	58,9	53,7	51,5	47,9

Infine, la Tabella 4.12 illustra ciò che accade durante i giorni non lavorativi, evidenziando che la regione dei prezzi di picco nelle ore mattutine è fondamentalmente eliminata. Per quanto riguarda la regione dei prezzi di picco, rimane comunque ampia durante la notte.

Tabella 4.12 – Andamento PUN giorno medio mensile – Giorni festivi.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	52,6	48,9	46,1	42,6	41,2	39,8	43,8	48,0	49,2	51,0	53,2	53,7	53,8	50,6	50,6	53,8	57,6	63,3	65,4	65,9	63,7	60,7	55,4	50,2
Febbraio	48,2	45,5	42,4	39,7	39,3	39,7	43,8	46,1	47,4	48,8	48,3	46,6	45,7	41,9	42,4	44,8	50,1	56,3	64,8	68,3	66,1	62,0	56,3	50,0
Marzo	49,0	45,2	41,2	40,0	41,5	43,8	45,2	44,6	45,6	48,3	51,4	52,0	50,5	41,9	39,6	44,8	50,7	55,2	67,5	69,2	64,9	59,1	52,1	46,8
Aprile	48,8	43,2	40,3	38,5	40,1	44,6	44,5	45,0	45,5	44,9	43,2	38,2	34,9	27,0	24,2	27,6	33,1	40,9	49,8	58,9	69,1	65,1	57,7	51,0
Maggio	49,7	46,2	40,1	36,6	39,7	43,7	40,5	42,6	43,8	43,2	44,1	41,3	37,6	31,1	29,0	33,8	38,7	42,6	49,4	56,4	62,8	62,8	58,1	50,7
Giugno	50,0	47,5	43,8	41,0	41,5	40,8	39,2	39,4	39,3	42,4	44,5	41,1	38,9	32,9	31,9	36,4	44,0	44,7	50,3	56,4	63,1	65,7	62,0	53,7
Luglio	55,8	52,3	49,6	47,9	46,6	44,7	41,9	42,5	41,3	42,6	44,0	42,9	41,4	39,2	37,8	39,4	43,7	47,4	51,6	56,9	61,6	63,4	60,9	55,5
Agosto	57,5	55,7	53,6	52,0	50,8	52,9	50,3	48,5	47,1	47,2	48,3	47,8	47,3	44,5	44,3	46,8	49,9	52,1	55,5	63,1	70,4	69,7	64,7	59,6
Settembre	58,5	54,8	53,2	52,4	52,1	52,3	54,7	53,4	52,2	54,4	54,6	53,5	52,0	48,4	48,1	50,3	52,9	55,5	59,8	68,9	71,0	65,3	62,2	56,0
Ottobre	54,5	51,6	49,9	48,9	47,6	48,0	49,5	51,2	51,8	52,6	52,5	51,7	50,3	46,5	46,3	48,8	53,0	55,7	61,9	72,4	71,1	65,5	58,6	53,5
Novembre	48,1	44,8	39,8	38,7	38,0	40,2	42,7	45,5	46,5	49,0	50,5	50,4	51,4	49,8	50,0	52,0	53,8	59,3	61,3	61,5	58,7	54,6	52,4	48,3
Dicembre	46,5	40,0	37,1	33,2	32,2	35,2	40,2	45,0	45,8	47,5	48,5	47,2	47,4	44,3	45,7	50,1	54,9	60,2	60,3	61,0	59,1	56,2	51,7	45,7

4.1.6 Identificazione della strategia di spostamento temporale dei carichi

In questa sezione sono state affrontate e discusse le implicazioni associate all’implementazione della strategia di spostamento temporale dei carichi.

È importante sottolineare che il comando di spostamento viene consegnato agli utenti finali una volta verificate entrambe le condizioni di soglia sul prezzo e sulla potenza (cioè sul valore del PUN e sul valore medio di assorbimento P). Tali condizioni di soglia possono cambiare dinamicamente, poiché i loro valori sono calcolati in termini di percentili, secondo l’equazione (4.2), e dipendono fortemente dal contenuto del database. Infatti, l’indice generico I_k associato al percentile desiderato (ad esempio fissando il 35° percentile che comporta I_k uguale a I_{35}) è stato calcolato come segue:

$$I_k = 0,5 + \frac{n \cdot k}{100} \tag{4.2}$$

dove n indica il numero di dati campione ordinati.

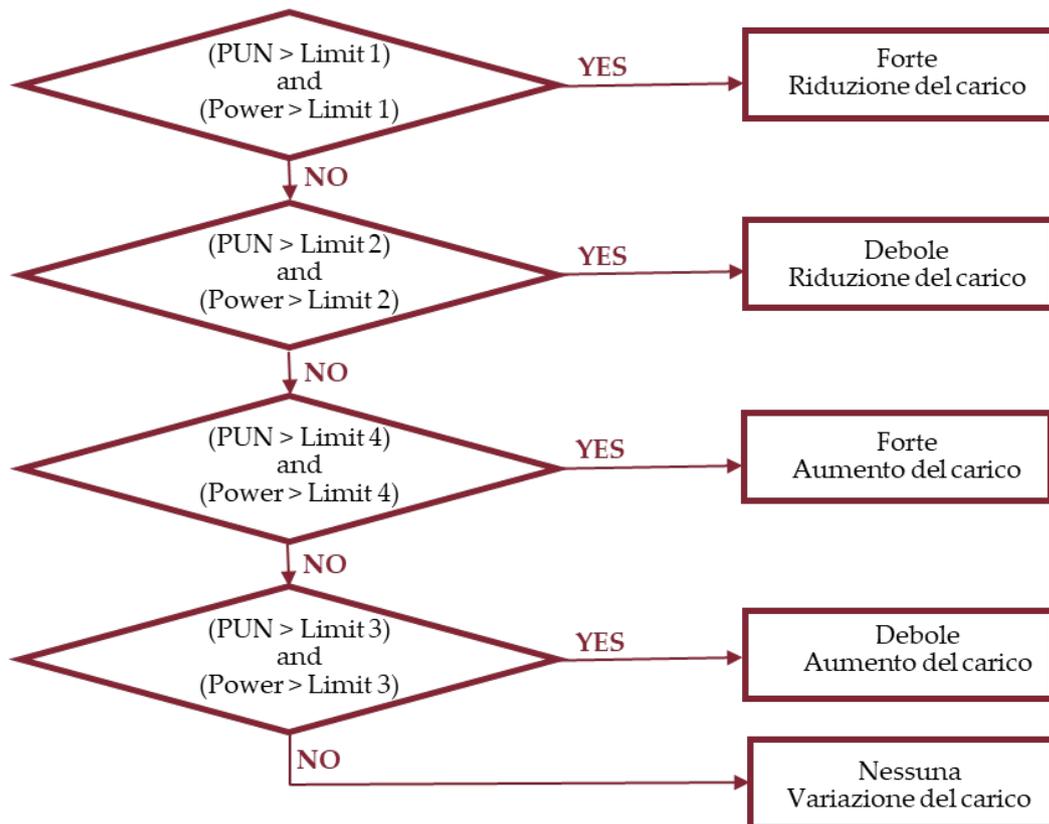


Figura 4.9 – Diagramma di flusso relativo al processo di ottimizzazione dei consumi.

Tabella 4.14 – Strategia di spostamento temporale dei carichi – Giorni semifestivi.
 (-2) Forte riduzione del carico; (-1) Debole riduzione del carico; (0) Nessuna variazione del carico;
 (1) Debole aumento del carico; (2) Forte aumento del carico.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	1	2	2	2	2	2	1	0	0	-1	-1	0	1	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-2	-1	-1	1
Febbraio	1	1	2	2	2	2	1	0	0	-1	-1	0	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	1
Marzo	0	1	1	2	2	1	0	0	0	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-1	0
Aprile	0	1	1	1	2	1	0	0	0	-2	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-1	0
Maggio	0	0	1	2	2	2	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-1	1
Giugno	0	0	0	1	1	1	1	1	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	-2	-2	0
Luglio	0	0	0	0	1	1	1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	-1
Agosto	-1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	-1	0	-1	-2	-1	-2	-1
Settembre	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	-1	-2	-2	-2	-1	1
Ottobre	0	0	1	1	2	1	0	0	-1	-1	0	1	0	0	0	1	0	-1	0	-2	-2	-1	0	0
Novembre	1	1	1	2	2	2	1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	-2	-2	-1	-1	-2	-1	0	1
Dicembre	1	1	2	2	2	2	2	0	0	-1	-1	0	1	1	0	-1	-2	-2	-1	-2	-2	-1	0	0

Infine, nel caso dei giorni non lavorativi, i carichi elettrici che si verificano nelle ore serali (dalle 19:00 alle 23:00) possono essere spostati in avanti nelle ore notturne (dalle 3:00 alle 7:00). Rispetto ai casi precedenti, lo spostamento del carico dalle ore del mattino verso il pomeriggio non è sempre richiesto (Tabella 4.15).

Tabella 4.15 – Strategia di spostamento temporale dei carichi – Giorni festivi.
 (-2) Forte riduzione del carico; (-1) Debole riduzione del carico; (0) Nessuna variazione del carico;
 (1) Debole aumento del carico; (2) Forte aumento del carico.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	0	1	2	2	2	2	2	2	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	-2	-1	-1	-2	-2	-2	-1	1
Febbraio	0	1	2	2	2	2	1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-2	-2	-2	-2	0
Marzo	-1	1	2	2	2	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	0	0	-1	0	0	-2	-2	-1	-1	0
Aprile	0	1	1	1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	-1	-2	-2	-2	-2	-1
Maggio	0	0	1	2	1	0	1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	-2	-2	-2	-1
Giugno	0	0	0	1	1	1	2	1	1	1	-1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-1
Luglio	-1	0	0	0	0	1	2	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-2	-1	0
Agosto	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1
Settembre	0	0	1	2	2	2	0	1	1	-1	0	1	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	-2	-2	-1	0
Ottobre	0	1	1	2	2	2	1	1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	-2	-1	0
Novembre	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	-1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-1	0
Dicembre	1	1	2	2	2	2	2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-1	1

4.2 Implementazione e simulazione di scenari reali di trasferimento del carico basati su una strategia di flessibilità - Il settore residenziale italiano come caso di studio

L'applicazione di un programma di Demand Response (DR) richiede una precisa conoscenza della flessibilità che la generica utenza può mettere a disposizione.

Nel caso delle utenze residenziali, il potenziale di flessibilità è in generale basso e molto frammentato; ciò nonostante, attraverso un processo di aggregazione, anche le utenze residenziali possono offrire la propria flessibilità, contribuendo alla gestione ed alla sicurezza dei sistemi elettrici.

La classificazione dei carichi effettuata sulla base della natura del carico può essere utile solo per indagini preliminari (Figura 4.10), portando necessariamente ad una sovrastima dei carichi flessibili: (i) alcuni carichi, ritenuti flessibili in base alla classificazione, potranno risultare non flessibili, in relazione alla strategia di gestione; (ii) altri carichi potranno risultare non flessibili, in conseguenza di vincoli operativi al funzionamento degli elettrodomestici, eventualmente imposti da un sistema di gestione dell'energia domestica .

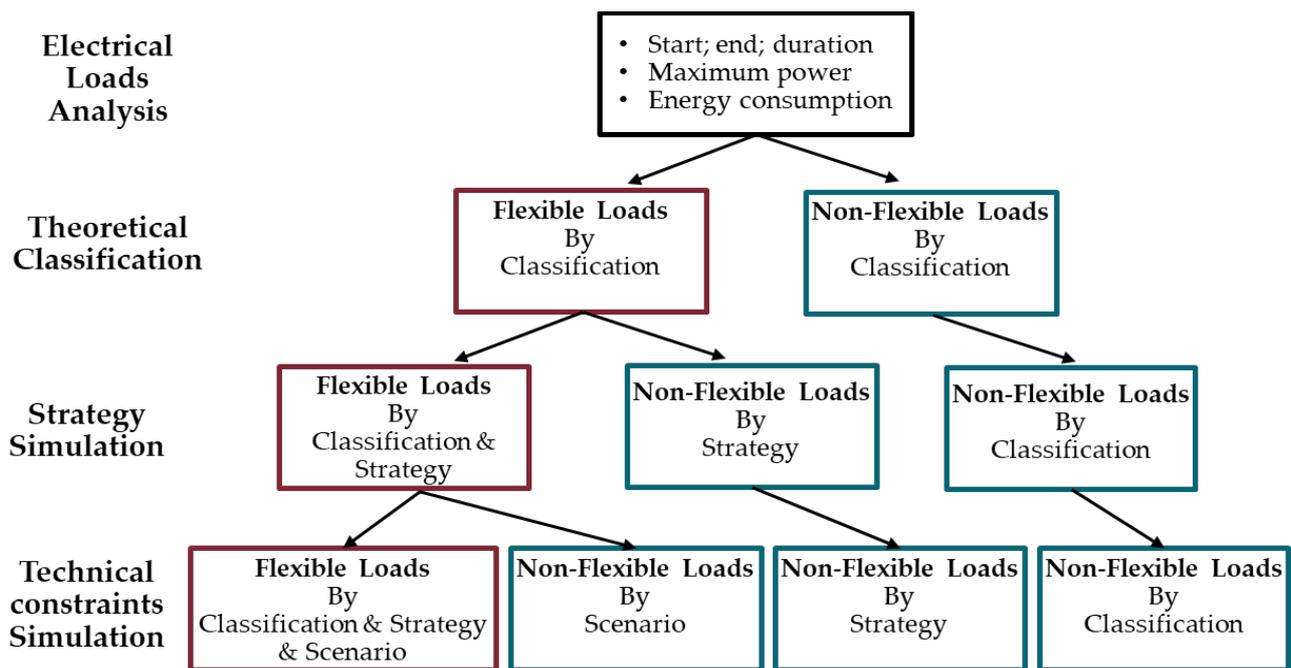


Figura 4.10 – Processo di quantificazione dei carichi flessibili.

In questo lavoro, è stata considerata la strategia di gestione descritta nel paragrafo precedente; tale strategia è stata definita attraverso un confronto tra i profili di consumo di un cluster di edifici e il prezzo all'ingrosso dell'energia elettrica in Italia e ha portato all'individuazione di periodi in cui il settore residenziale potrebbe ridurre o aumentare i consumi di energia elettrica, con una differenziazione per mesi e per giorni della settimana (feriali, semifestivi, festivi).

Sono poi stati definiti una serie di vincoli (Tabella 4.16) considerando: (V1) una "Flexibility Window" massima di 24 ore; (V2) il limite massimo alla potenza elettrica prelevabile dalla rete pubblica, per ciascuna utenza, in funzione del contratto; (V3) la necessaria presenza degli utenti per il funzionamento di alcuni elettrodomestici (aspirapolvere, ferro da stiro); (V4, V5) le correlazioni di funzionamento di alcuni elettrodomestici (lavatrice, asciugatrice, lavastoviglie); (V6) il legame complesso tra il comportamento stocastico degli occupanti e il funzionamento dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento; (V7) limitazioni poste dall'utente per non diminuire il livello di soddisfazione (proprio o dei vicini di casa), ad esempio per rumori notturni.

Tabella 4.16 – Vincoli operativi al funzionamento degli elettrodomestici.

Vincolo (V)	Criterium	Definizione
V1	Flexibility Window	Spostamento massimo entro le 24 ore successive
V2	Potenza massima contatore (condizioni di distacco)	$P > 14.0$ kW per $\tau > 2$ secondi $P > 4,2$ kW per $\tau > 2$ minuti $P > 3,3$ kW per $\tau > 182$ minuti
V3	Utilizzo aspirapolvere, ferro da stiro	Presenza di persone nell'abitazione
V4	Asciugatrice e Lavatrice,	Utilizzo asciugatrice entro tre ore dalla fine del ciclo della lavatrice
V5	Lavastoviglie	Fine ciclo prima del pasto successivo
V6	Riscaldamento e raffrescamento	Presenza in casa entro le 4 ore successive (ovvero accensione entro le 4 ore precedenti)
V7	Silenzio di notte	No accensioni/spostamenti in orari notturni compresi tra le 00:00 e le 06:00

Con l'obiettivo di quantificare i carichi flessibili, in aggiunta alla quantificazione dei carichi effettuata sulla base della classificazione teorica (S0), sono stati simulati 4 scenari, caratterizzati dall'applicazione della strategia di gestione e da una diversa presenza delle condizioni di vincolo sopra esposte (Tabella 4.17).

Tabella 4.17 – Scenari simulati.

Scenario (S)	Criterio
S0	Theoretical Classification
S1	Load Shifting Strategy Simulation; No Bonds Applied
S2	Load Shifting Strategy Simulation; Bonds V1, V2, V3 Applied
S3	Load Shifting Strategy Simulation; Bonds V1, V2, V3, V4, V5, V6 Applied
S4	Load Shifting Strategy Simulation; Bonds V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 Applied

La classificazione teorica (S0) deriva da analisi preliminari effettuate sulle abitazioni considerate e consente di stimare in maniera statica la flessibilità, considerando possibile lo spostamento di tutti i cicli delle apparecchiature flessibili per la loro natura.

Per l'applicazione della strategia (S1), è stato effettuato un confronto tra la collocazione oraria del generico ciclo flessibile e le richieste di spostamento del carico (Load Reduction Time; Load Enhancement Time) risultanti dalla strategia considerata (Tabella 4.13, Tabella 4.14, Tabella 4.15); sulla base del confronto, sono stati quindi considerati non flessibili i carichi che risultavano già nella giusta collocazione oraria (carico in orario "Load Increasing Time o No Load Variation") e i carichi che non potevano essere spostati, in assenza di una richiesta successiva del tipo "Load Enhancement Time".

L'inserimento di ulteriori condizioni di vincolo (S2-S3-S4) ha portato ad una limitazione della quantità di carichi che poteva essere spostata, data l'incompatibilità di alcune collocazioni orarie del tipo "Load Enhancement Time" con i rispettivi vincoli dello scenario.

I carichi flessibili sono stati caratterizzati utilizzando, per ognuno dei cicli di funzionamento della generica appliance (i) l'orario di inizio; (ii) la durata del ciclo; (iii) l'energia consumata (E_{Flex}); (iv) la potenza massima (P_{max}).

Gli effetti dell'applicazione della strategia e dei vincoli sui carichi flessibili sono stati valutati considerando alcuni indicatori che possono sintetizzare l'entità della flessibilità in termini statistici ed energetici:

- *Real Flexibility (RF)* è la percentuale effettiva di Load Shifting effettuati rispetto ai cicli totali della generica apparecchiatura;
- *Energy Shift (ES)*, è il consumo di energia spostato in conseguenza delle azioni di flessibilità adottate;
- *Peak Shaving (PS)*, ovvero la massima riduzione del picco conseguibile grazie allo spostamento dei cicli, in termini di potenza, tra lo scenario di analisi S_x e la condizione senza spostamenti (S0).

$$RF_{S_x} = \frac{N_{Flex,S_x}}{N_{flex,S_0}} \quad (4.4)$$

$$ES_{S_x} = \sum E_{Flex,S_x} \quad (4.5)$$

$$PS_{S_x} = Max(P_{max,S_0} - P_{max,S_x}) \quad (4.6)$$

dove:

- $N_{Flex,S0}$ rappresenta il conteggio totale del numero di cicli flessibili prima di applicare la strategia e i vincoli (Scenario S0);
- $N_{Flex,Sx}$ rappresenta il numero effettivo di Load Shifting effettuati, in conseguenza dell'applicazione dello scenario Sx ;
- $P_{max,S0}$ rappresenta la potenza massima registrata (nell'arco di 15 minuti) prima di applicare la strategia e i vincoli (Scenario S0);
- $P_{max,Sx}$ rappresenta la potenza registrata (nell'arco di 15 minuti), in conseguenza dell'applicazione dello scenario Sx nello stesso momento in cui si è verificata la $P_{max,S0}$.

Il primo indicatore (RF) è stato definito a supporto delle analisi del presente lavoro; gli altri due indicatori (ES, PS) sono largamente impiegati in letteratura per valutare la flessibilità in ambito residenziale, per definire le implicazioni politiche di diversi scenari nei mercati dell'elettricità, anche in associazione alla riduzione dei costi o con la volontà di definire strategie di gestione degli accumuli.

4.2.1 Flexible Loads by Classification

Sulla base delle misurazioni effettuate nelle 14 abitazioni archetipo sono state effettuate delle analisi preliminari volte a individuare le caratteristiche salienti dei cicli delle apparecchiature presenti nelle abitazioni e le abitudini degli occupanti delle case.

In particolare, è stata individuata una tendenza per le appliance più energivore e che presentano tempi di funzionamento maggiori:

- la lavastoviglie presenta un orario medio di accensione, per tutte le abitazioni considerate, e per tutti i mesi, intorno alle 17:30, con uno spostamento medio di + 4:30 ore (40esimo percentile) e - 1:30 ore (60esimo percentile);
- la lavatrice presenta un orario medio di accensione intorno alle 14:15 con uno spostamento di + 1:30 ore e - 1:45 ore;
- l'utilizzo del condizionatore è molto diversificato tra le abitazioni (cicli di diversa durata, differenti set-point di temperatura) con un valor medio di inizio ciclo intorno alle 17:15 e uno spostamento medio di $\pm 4:15$ ore.
- le altre apparecchiature presentano delle variabilità maggiori e una ricorrenza minore e quindi non permettono l'individuazione di una tendenza univoca, se non per quanto riguarda la finestra temporale più frequente: quella centrale della giornata dopo le 11:00 ed entro le 17:00.

Inoltre, appare chiaramente come le abitudini lavorative degli utenti condizionino fortemente l'utilizzo delle appliance; negli orari dalle 17:00 alle 22:00 si concentrano buona parte dei carichi elettrici, essendo la variazione rispetto alla media molto spostata verso orari del tardo pomeriggio (condizionatore e altre apparecchiature minori in conseguenza della presenza in casa; lavastoviglie con lo scopo di preparare le stoviglie per la cena; lavatrice in conseguenza del rientro a casa e della possibilità di utilizzare l'asciugatrice (ove presente) entro la serata). In conseguenza di quanto rilevato, il profilo di assorbimento elettrico delle abitazioni considerate presenta un picco intorno a questi orari, coerentemente con il profilo di assorbimento elettrico nazionale.

Le seguenti figure rappresentano l'andamento giornaliero medio annuale dei carichi flessibili precedentemente descritti presenti nei 14 archetipi analizzati. È possibile osservare, come evidenziato in precedenza, come gli orari pomeridiani siano i più densi di carichi flessibili, in particolare nei giorni feriali (Figura 4.11), dove il carico maggiore di essi si concentra o nelle ore della prima mattinata oppure dopo cena, coerentemente con quello che è il profilo di assorbimento nazionale.

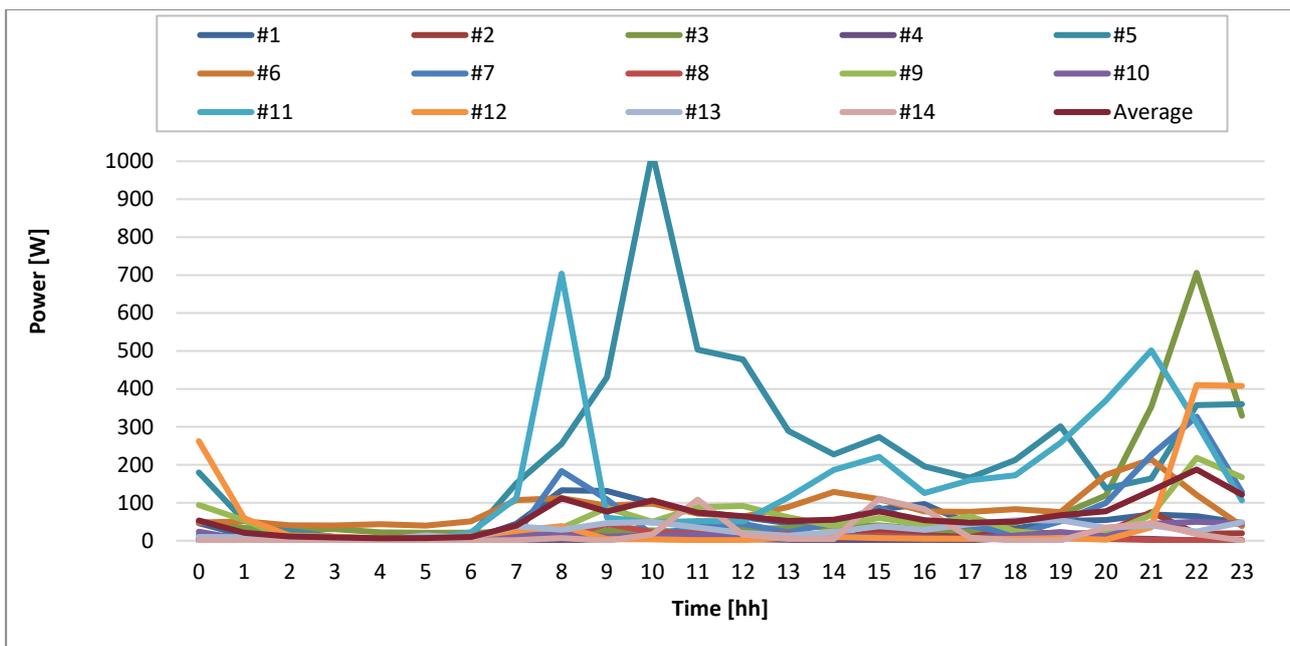


Figura 4.11 – Profili di carico flessibile giornaliero medio degli archetipi nei giorni feriali.

Nella Figura 4.12, relativa ai giorni semifestivi, e nella Figura 4.13, relativa ai giorni festivi, la variabilità degli orari in cui vengono effettuati cicli di apparecchiature flessibili è maggiore, ed è possibile riscontrare una tendenza all’utilizzo in orari di prima mattinata, intorno all’ora di pranzo e dopo l’ora di cena.

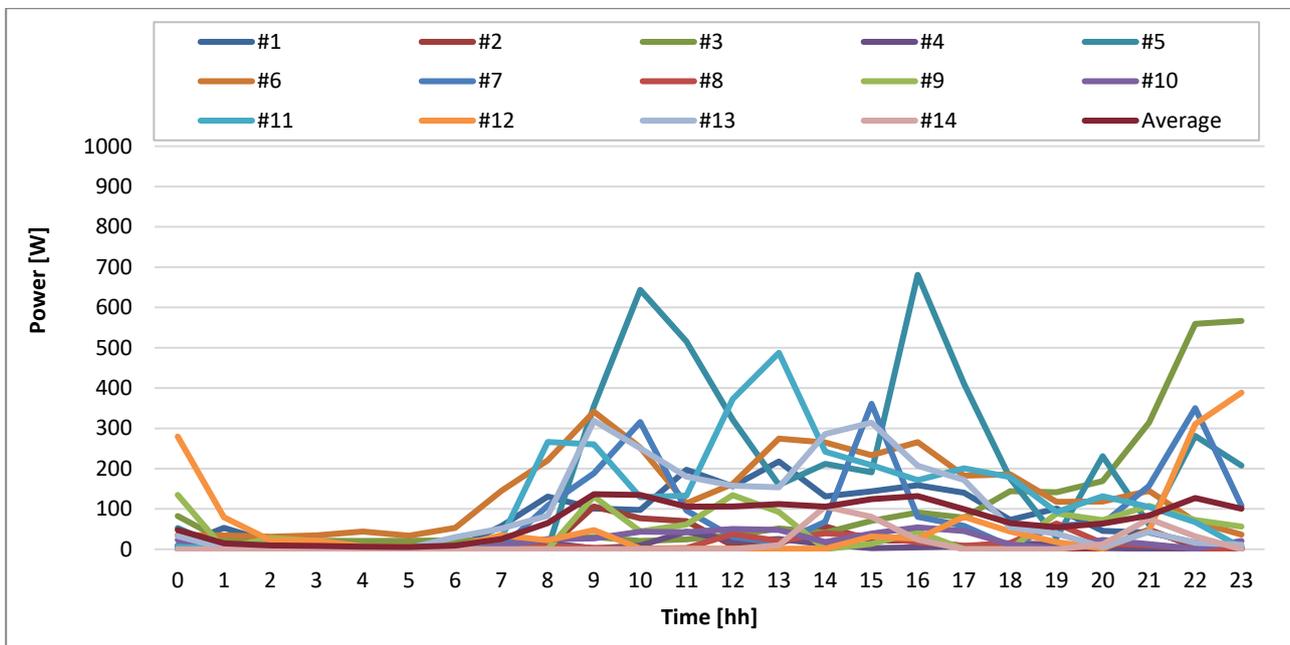


Figura 4.12 – Profili di carico flessibile giornaliero medio degli archetipi nei giorni semifestivi.

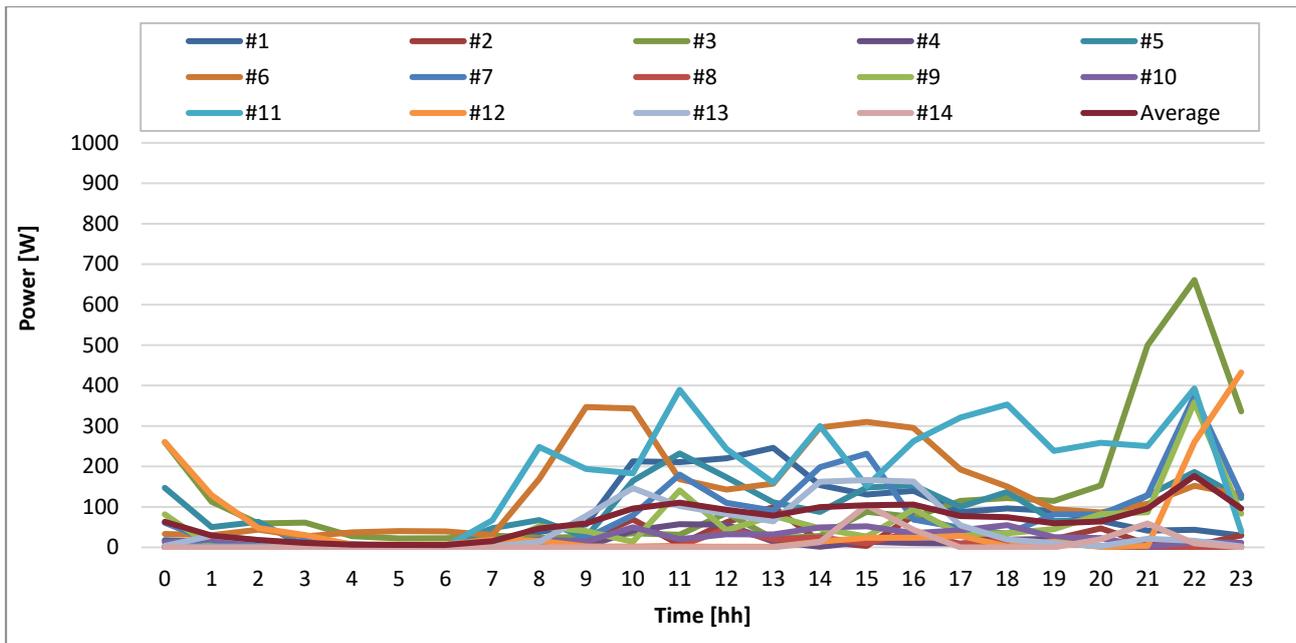


Figura 4.13 – Profili di carico flessibile giornaliero medio degli archetipi nei giorni festivi.

La Tabella 4.18 mostra i risultati della caratterizzazione energetica effettuata per i 14 archetipi, sulla base delle informazioni raccolte; tale caratterizzazione è stata utilizzata per una quantificazione preliminare dei carichi flessibili, conformemente allo scenario S0. In media: (i) i carichi flessibili sono pari a 811 kWh/anno; (ii) i carichi non flessibili sono pari a 1.333 kWh/anno.

Tabella 4.18 – Parametri di riferimento degli archetipi.

Parametro	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
$N_{Flex,S0}$	840	379	1030	172	1365	1261	1019	246	633	289	1868	650	984	504
Flexible Loads [kWh/a]	858	294	660	355	1.758	927	661	188	1.096	728	866	1.366	957	637
Non-Flexible Loads [kWh/a]	2.648	1.024	1.085	879	1.98	1.000	1.099	881	2.384	1.218	1.049	1.754	1.439	959

4.2.2 Flexible Loads by Strategy & Scenario

Gli scenari simulati sono caratterizzati dall'applicazione della strategia di gestione e da una diversa presenza delle condizioni di vincolo (Tabella 4.17); al crescere dei vincoli si ha una diminuzione delle flessibilità che le utenze analizzate sono in grado di fornire.

Utilizzando l'indicatore RF si può procedere con una prima valutazione degli scenari simulati, considerando la variazione di RF per i diversi archetipi e per i diversi mesi dell'anno. La Tabella 4.19 riporta $N_{Flex,Sx}$ per i 14 archetipi, per i 4 scenari simulati (in aggiunta allo scenario S0), su base annuale.

Tabella 4.19 – Valori di $N_{Flex,Sx}$ per i 14 archetipi con applicazione della Load Shifting strategy.

Parametro	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
$N_{Flex,S0}$	840	379	1030	172	1365	1261	1019	246	633	289	1868	650	984	504
$N_{Flex,S1}$	432	236	526	83	753	534	769	160	334	194	1218	494	581	315
$N_{Flex,S2}$	430	236	520	83	740	425	765	160	334	194	1216	492	560	315
$N_{Flex,S3}$	339	236	201	83	661	386	684	160	265	167	1216	463	466	266
$N_{Flex,Sx}$	304	222	195	81	609	322	636	138	257	144	1037	414	367	259

La Figura 4.14 riporta i valori di RF su base annuale, per ognuno degli archetipi e per ognuno degli scenari. Si può notare come la presenza di vincoli sempre più stringenti negli scenari S2, S3 e S4 riduca considerevolmente il valore della RF.

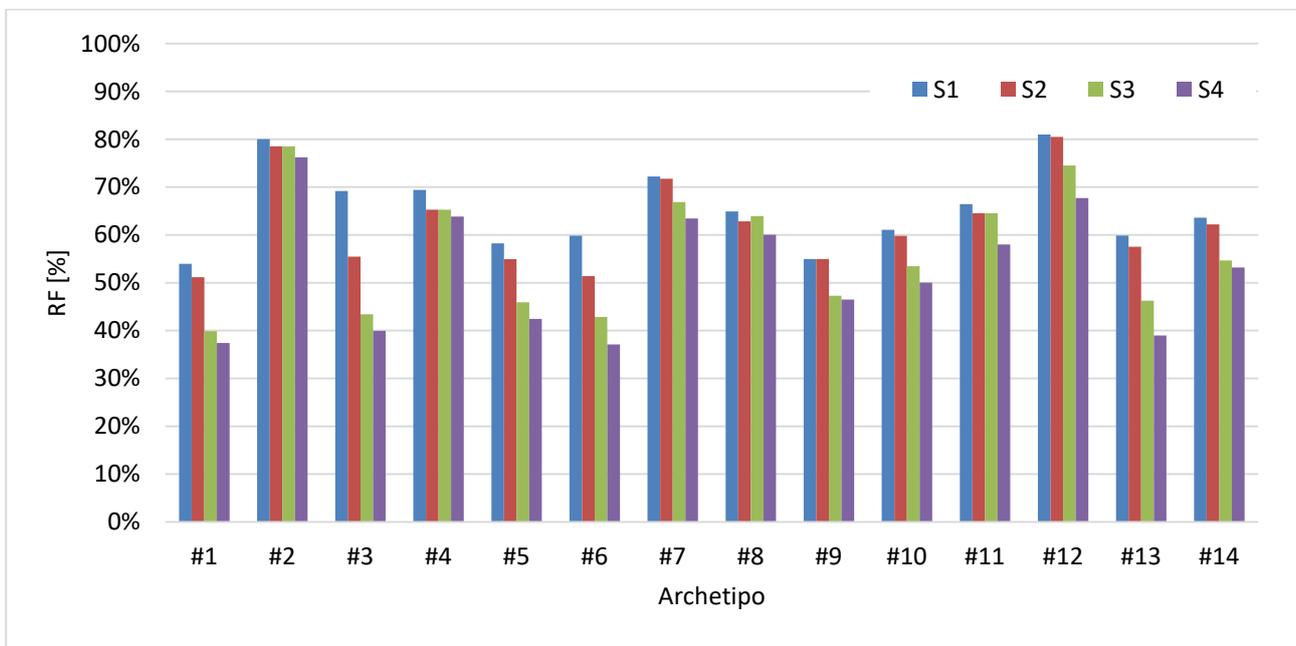


Figura 4.14 – RF: valori medi annuali per i 14 archetipi.

In particolare, RF decresce da un valor medio del 66% per lo scenario senza vincoli (S1), ad un valore del 53% con tutti i vincoli considerati (S4); si osserva una forte diminuzione di RF specialmente tra gli scenari S2 (RF = 62%) e S3 (RF = 56%), in quanto l'introduzione di vincoli su apparecchiature molto energivore (lavatrice, lavastoviglie, condizionatore) rende più difficile effettuare spostamenti sui cicli di queste apparecchiature; in particolare, questa diminuzione è più marcata per quegli archetipi che presentano valori di RF mediamente più bassi (ad esempio #1, #3, #5, #6, #13), in quanto sono quelle che utilizzano maggiormente queste apparecchiature (rispetto ad altre apparecchiature) e risentono quindi maggiormente dell'introduzione dei vincoli.

La Tabella 4.20 riporta $N_{Flex,Sx}$ per i diversi mesi dell'anno, per i 4 scenari simulati, considerando l'insieme dei 14 archetipi.

Tabella 4.20 – Valori mensili di $N_{Flex,Sx}$ con applicazione della Load Shifting strategy.

Parametro	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dec
$N_{Flex,S0}$	1878	1065	872	1235	924	640	792	597	1088	547	680	934
$N_{Flex,S1}$	1220	693	589	795	603	404	301	234	561	356	425	515
$N_{Flex,S2}$	1205	693	586	777	601	395	282	188	501	354	423	515
$N_{Flex,S3}$	906	634	510	619	514	358	262	160	470	329	369	456
$N_{Flex,S4}$	677	578	464	510	467	325	250	158	433	295	326	409

La Figura 4.15 riporta i valori di RF su base mensile, per l'insieme dei 14 archetipi e per ognuno degli scenari. Anche in questo caso, si può notare come la presenza di vincoli sempre più stringenti negli scenari S2, S3 e S4 riduca il valore della RF, con i mesi estivi caratterizzati generalmente da valori più bassi.

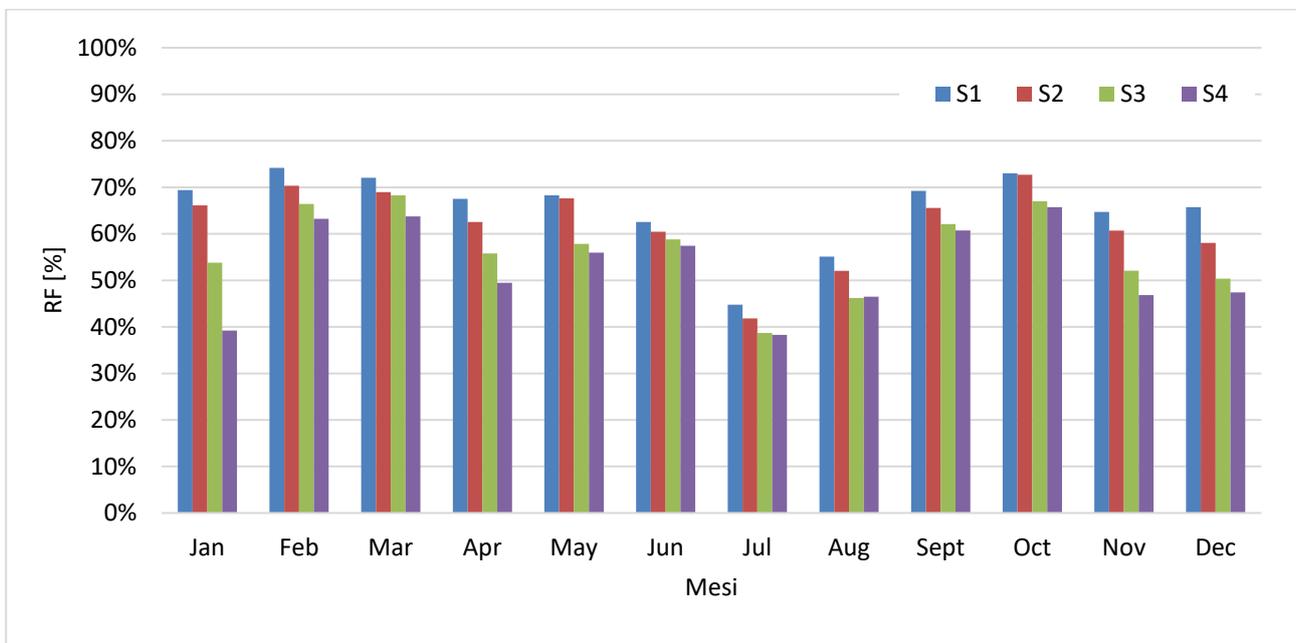


Figura 4.15 – RF: valori medi mensili.

La diminuzione di RF nei mesi estivi, comune a tutti gli scenari, dipende principalmente dall'utilizzo degli impianti di climatizzazione estiva, risultando in generale difficile lo spostamento dei cicli di questa apparecchiatura, in assenza di intervalli di Load Reduction Time compatibili.

Inoltre, per alcuni mesi (ad esempio quelli estivi, da maggio a settembre) si può notare una minore sensibilità all'introduzione dello scenario S4 (quello che limita gli spostamenti verso orari notturni); ciò è dovuto a fattori climatici e di orario (maggiore produzione fotovoltaica nel sistema elettrico nazionale, introduzione dell'orario legale e posticipazione del carico relativo all'illuminazione), con conseguente presenza negli orari centrali della giornata (dalle ore 10:00 alle ore 16:00) di più periodi di Load Enhancement Time, che riducono la necessità di spostare carichi verso orari notturni.

In generale, i mesi in cui RF si riduce notevolmente con lo scenario S4, sono quelli in cui gli orari di Load Reduction Time sono maggiori nell'arco della giornata rispetto alla notte, e quindi sono maggiori le necessità di spostare carichi verso orari notturni (mentre l'introduzione dello scenario S4 lo impedisce).

4.2.3 Energy Shift

È da sottolineare che la RF è un valore percentuale relativo ai cicli della stessa abitazione; quindi, non è un valore direttamente confrontabile tra gli archetipi senza effettuare le dovute analisi sulle caratteristiche dei carichi. Infatti, è da notare come spesso le utenze che presentano una RF minore siano quelle in grado di fornire una flessibilità maggiore in termini di energia (ES), come ad esempio è riscontrabile per gli archetipi #6 e #13. Inversamente gli archetipi #2, #4 e #8 presentano una scarsa sensibilità alla variazione di scenario, ma valori di ES piuttosto bassi. Questo è riscontrabile nella Figura 4.16, che rappresenta il valore medio annuale di ES mensile raggiunto da ogni utenza, in funzione dello scenario di analisi.

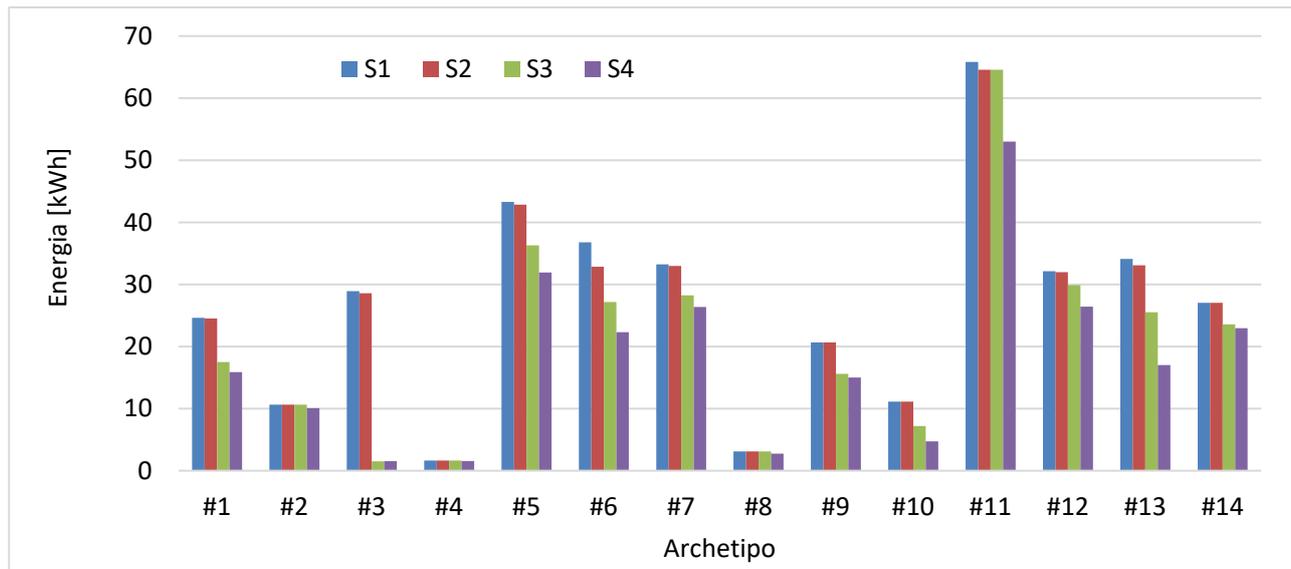


Figura 4.16 – Valori medi annuali di Monthly Energy Shift, tracciati per i 14 archetipi e per i 4 scenari.

Analogamente a quanto fatto per l'indicatore RF, viene presentato nella Figura 4.17 il valore medio mensile di ES per l'insieme dei 14 archetipi, per i quattro scenari considerati. È possibile osservare la variazione presente tra i mesi estivi e quelli invernali, data dalla differenziazione delle appliance flessibili utilizzate.

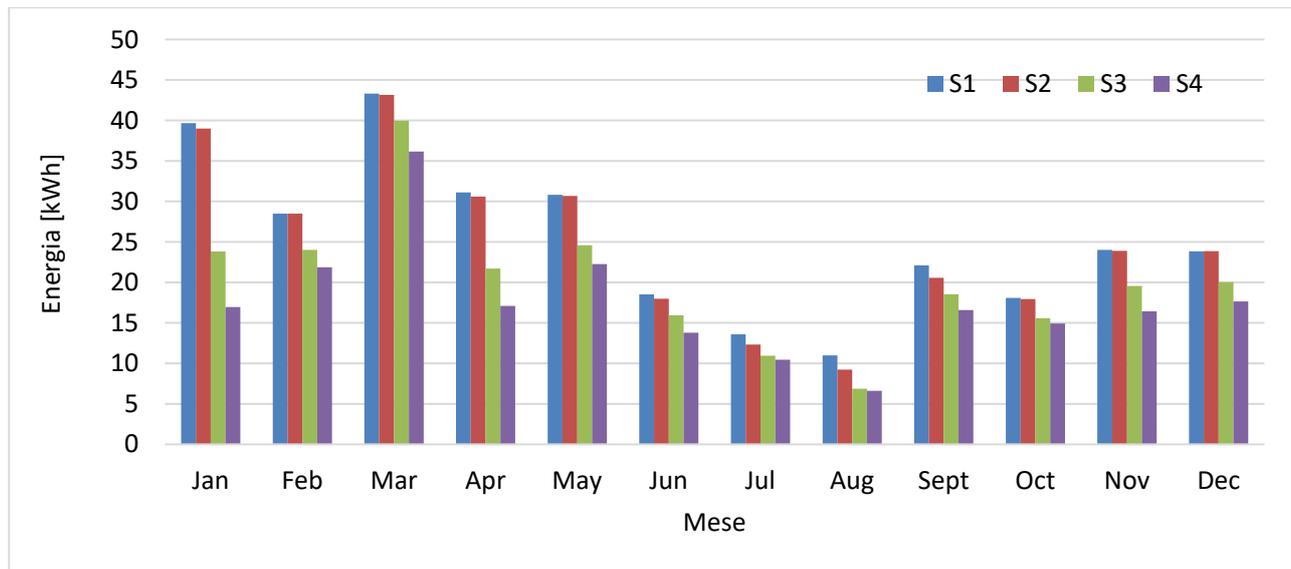


Figura 4.17 – Valori medi mensili di Monthly Energy Shift, tracciati per la totalità dei 14 archetipi e per i 4 scenari.

Le seguenti figure (Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4.21) rappresentano la dispersione di ES, per i vari mesi e per tutti gli archetipi. Sono presenti tali grafici per i quattro scenari, in modo tale da rappresentare in maniera accurata tutte le dispersioni del valore di ES, ovvero il quantitativo di energia flessibile delle utenze.

È possibile notare la riduzione, in tutti i mesi, conseguente alla variazione di scenario e all'inserimento di vincoli. In particolare, questa variazione è maggiore laddove i valori di ES sono maggiori, essendo i carichi spostati di più in assoluto, e quindi statisticamente di più anche quelli non spostati.

In particolare, questo si verifica, come già evidenziato da altre analisi, nei mesi invernali, dove l'ultimo quartile arriva a valori di ES anche di 26 kWh/mese/utenza, con picchi anche di 43 kWh/mese/utenza. Con l'inserimento dei vincoli questi valori scendono fino a ridursi mediamente del 32,5%, passando da un valor medio, su tutto l'anno, di 27 kWh/mese/utenza ad uno di 18 kWh/mese/utenza.

Infatti, nei mesi invernali, si può osservare una elevata riduzione tra S1 e S4 della ES, con valori medi del mese di gennaio che scendono da 40 a 17 kWh/mese/utenza. La riduzione, invece, va ad attenuarsi nei mesi estivi, quelli con meno flessibilità disponibile, con valori di giugno che passano da 19 a 14 kWh/mese/utenza.

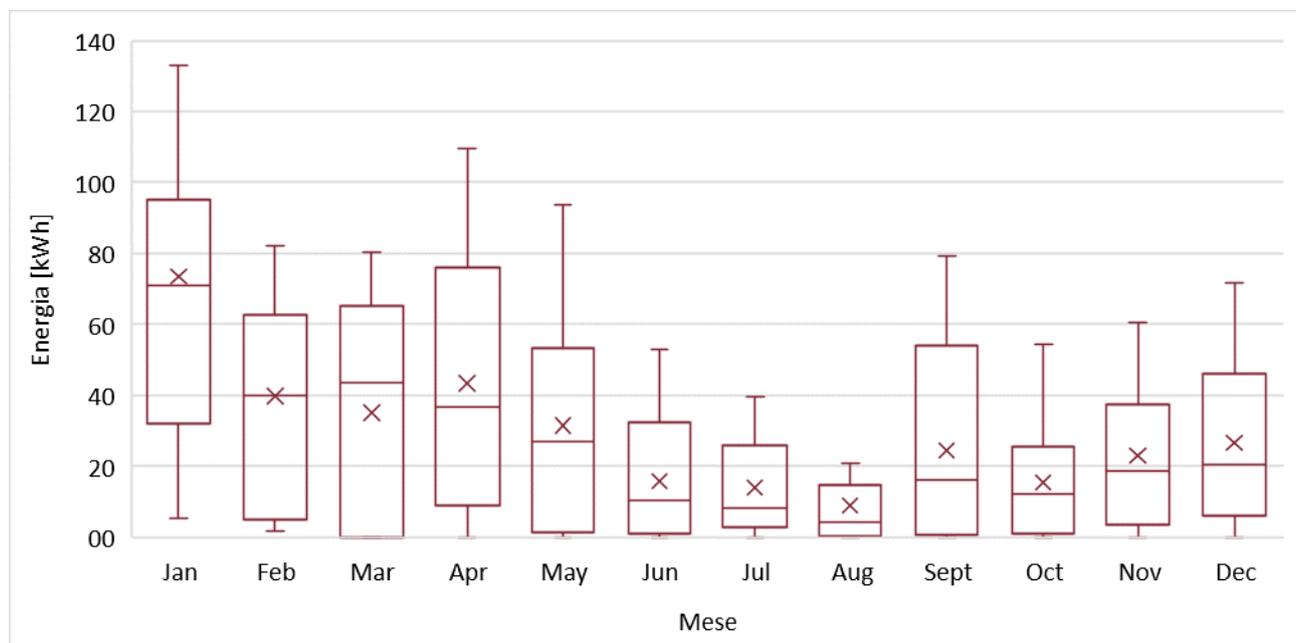


Figura 4.18 – ES: Scenario 1, valori medi mensili.

La riduzione nei vari mesi conseguente all'introduzione dei vincoli tecnici V1, V2 e V3 per la simulazione dello scenario S2, non è significativa nei suoi valori medi; lo è invece nei suoi valori di dispersione estremi (Figura 4.19).

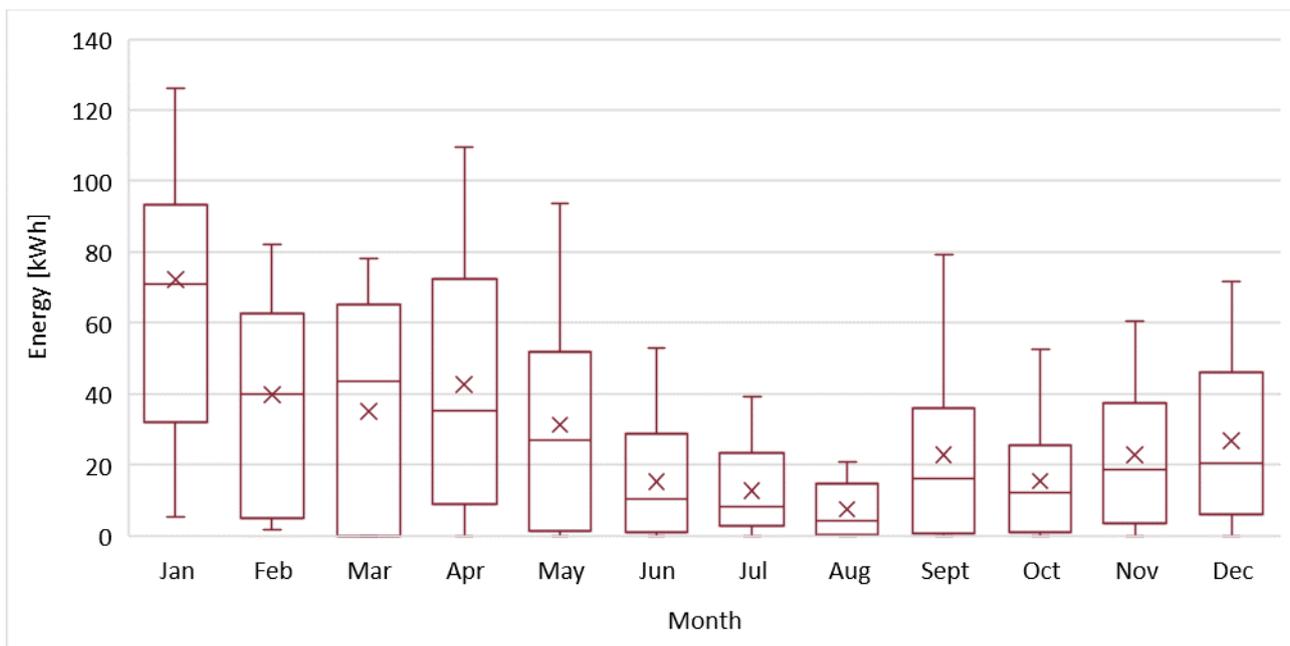


Figura 4.19 – ES: Scenario 2, valori medi mensili.

Con l'introduzione dei vincoli sulle appliance più energivore, nello scenario S3, la riduzione del ES diventa più evidente, in particolare per i mesi invernali, ovvero quelli con valori maggiori di ES (Figura 4.20). La variabilità mensile dei valori medi ottenuti, di contro, si riduce, presentando minori oscillazioni nell'arco dell'anno.

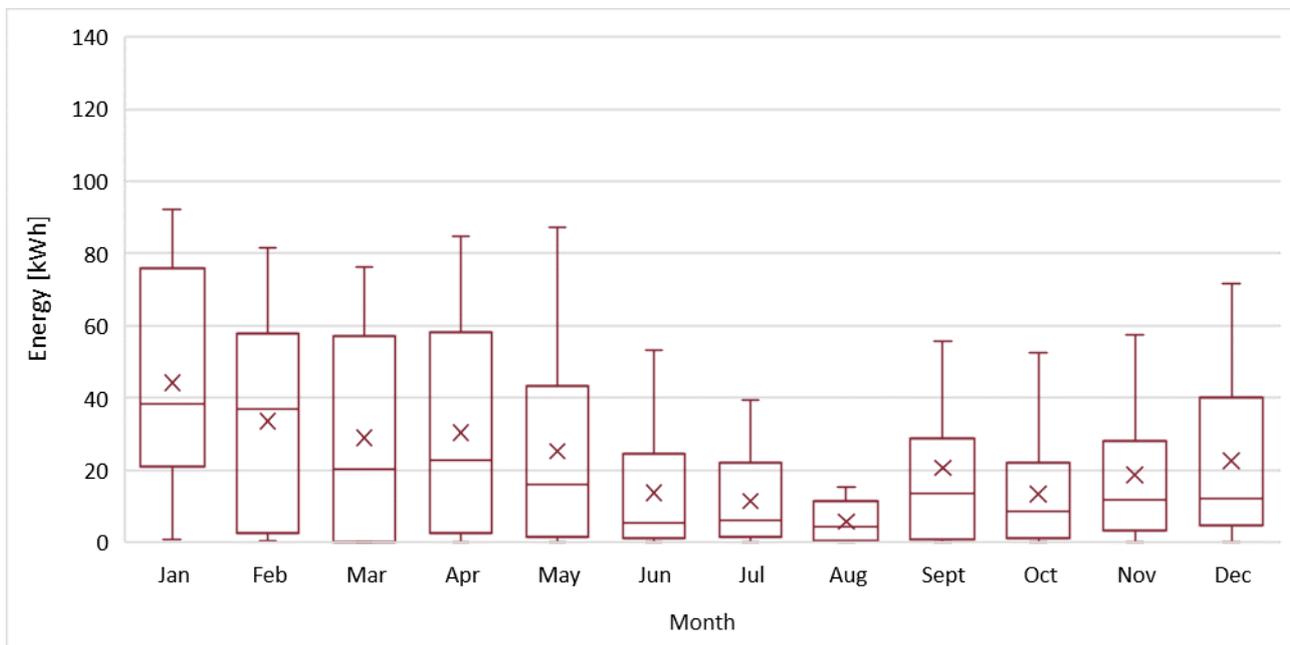


Figura 4.20 – ES: Scenario 3, valori medi mensili.

Con l'introduzione dello scenario di analisi più stringente, che impedisce gli spostamenti verso orari notturni, si nota una ulteriore riduzione ed appiattimento delle variabilità mensili di ES, sia nei valori medi che nei valori estremi di dispersione (Figura 4.21).

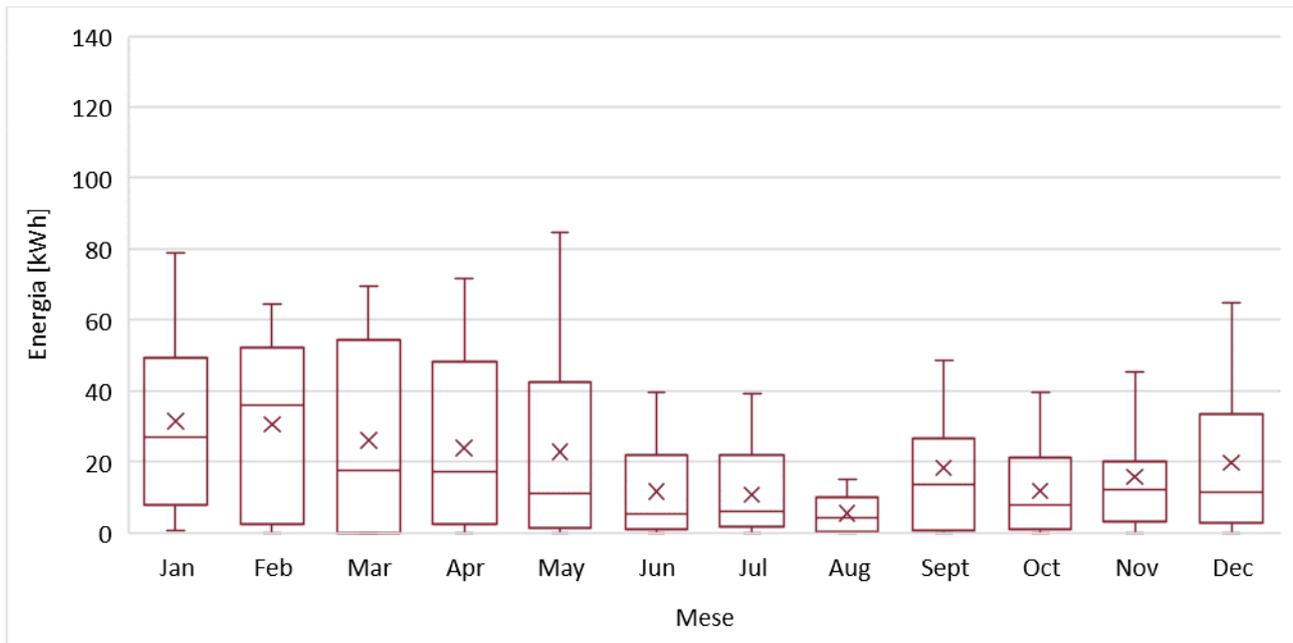


Figura 4.21 – ES: Scenario 4, valori medi mensili.

4.2.4 Peak Shaving

In Figura 4.22 e in Figura 4.23 sono presentati i grafici relativi al PS, ovvero il valore massimo registrato, in una finestra di 15 minuti, di riduzione di potenza di ogni singola utenza in conseguenza di una azione di flessibilità.

Si sottolinea che questo valore rappresenta solamente una potenzialità del sistema di flessibilità, utile ad individuare ad esempio un numero minimo di utenze che insieme possono fornire determinati parametri e standard di Demand Side Management verso il gestore della rete, in quanto questo valore potrebbe teoricamente essersi presentato anche solamente in un momento specifico.

Si nota inoltre in Figura 4.22 la variabilità tra le utenze, ad individuare quelle utenze che utilizzano appliance più energivore, e quindi potenzialmente possono fornire alla rete un servizio maggiore, e in Figura 4.23 la variabilità mensile, che subisce una piccola riduzione solamente nel periodo estivo.

La variabilità all'interno degli scenari resta pressoché invariata, a sottolineare la natura di questo indicatore (un valore massimo invece che una media come gli altri indicatori calcolati). In particolare, si riscontra una lieve diminuzione di questo indicatore tra gli scenari: 1678 W per S1, 1677 W per S2, 1612 W per S3, 1592 W per S4.

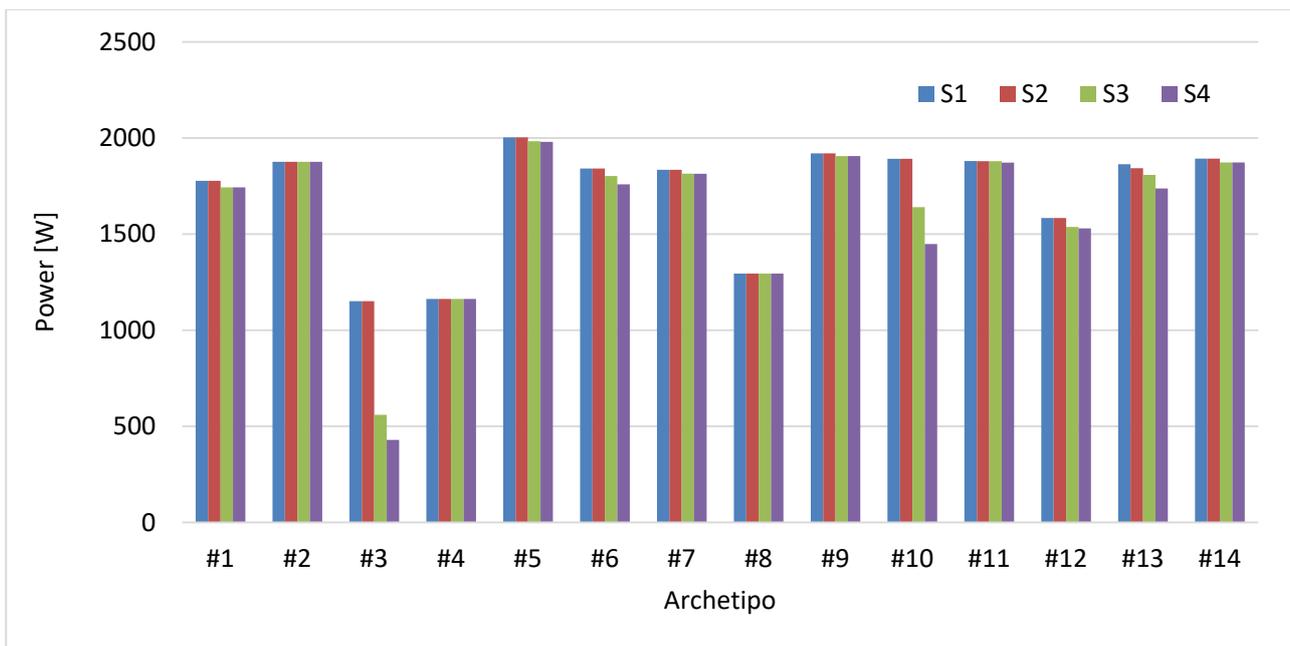


Figura 4.22 – PS: valori medi annuali per ogni archetipo.

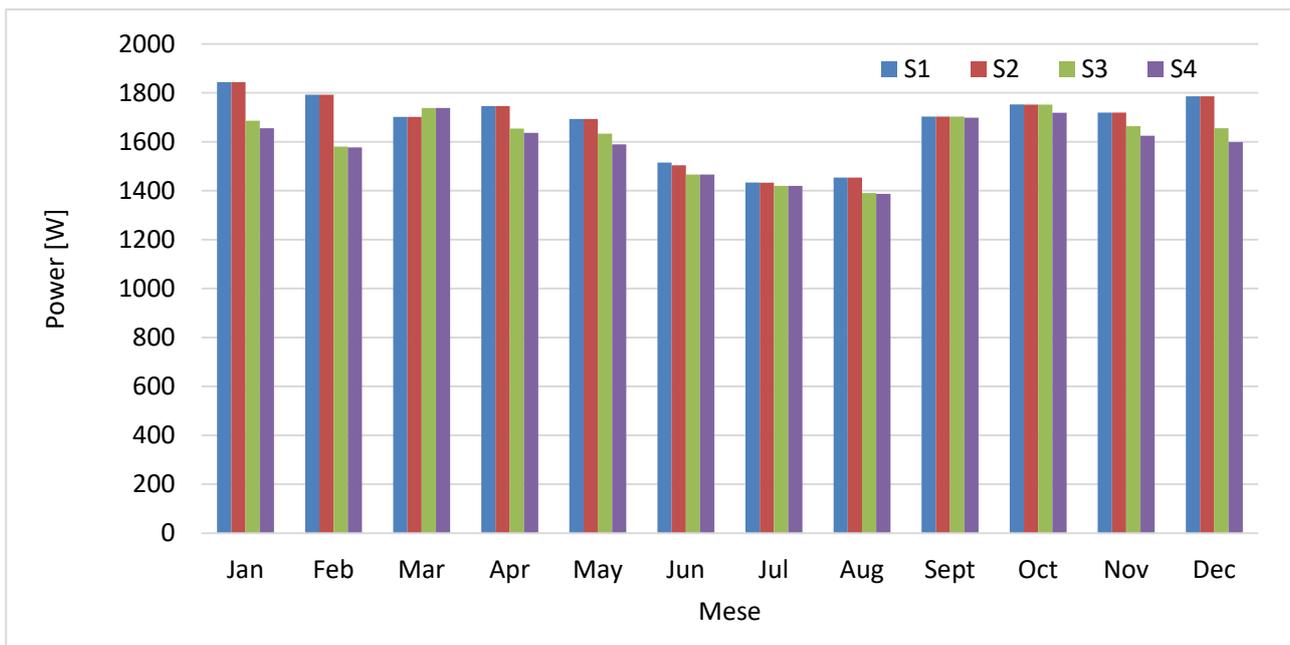


Figura 4.23 – PS: valori medi mensili per la totalità degli archetipi.

Nelle seguenti figure (Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27) vengono rappresentati i valori di PS nei vari mesi, con le loro dispersioni tra i singoli archetipi, analogamente a come già presentato per il ES. Queste figure rappresentano quindi la distribuzione delle massime potenze ridotte (PS) in conseguenza dell’applicazione dello scenario Sx calcolate per i singoli archetipi, per i mesi di analisi. È possibile osservare come in tutti gli scenari le variazioni consistenti si hanno nei valori di PS inferiori, piuttosto che in quelli maggiori. Questo è indice del fatto che alcuni archetipi mantengono il loro valore di PS registrato più o meno invariato tra i mesi dell’anno, mentre altri presentano valori di PS inferiori in alcuni mesi, generalmente quelli estivi. Inoltre, nella Figura 4.24 si nota come i valori mediani mensili non superino la soglia dei 2000 W, e si attestino in un range compreso tra i 1500 W ed i 1900 W.

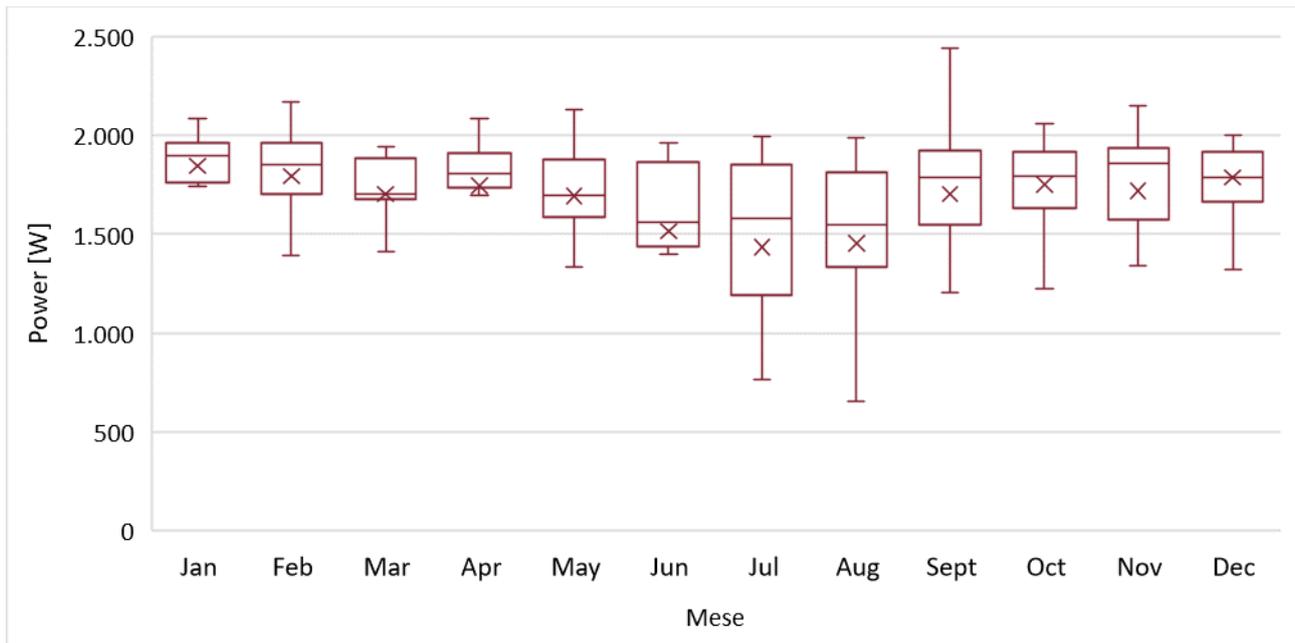


Figura 4.24 – PS: Scenario 1, valori medi mensili.

Nella Figura 4.25 è possibile osservare le variazioni le oscillazioni del PS per lo scenario S2. In particolare, rispetto allo scenario S1, si osserva come la differenza sia minima, in virtù della natura di questo indicatore, ed in particolare la differenza si può notare nei valori minimi delle dispersioni mensili.

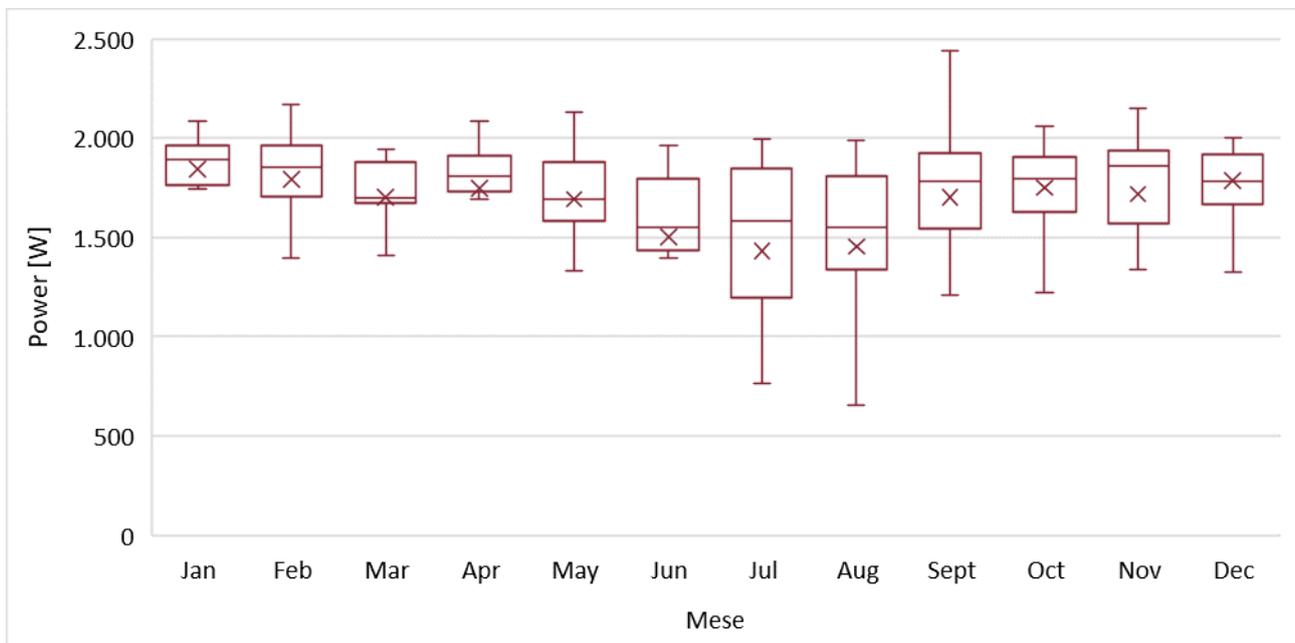


Figura 4.25 – PS: Scenario 2, valori medi mensili.

Questo aspetto è poco più significativo nello scenario S3 (Figura 4.26) in cui i valori minimi decrescono (il primo quartile quindi), e di conseguenza l'ampiezza della forbice di oscillazione dei valori aumenta (ad esempio nel mese di febbraio).

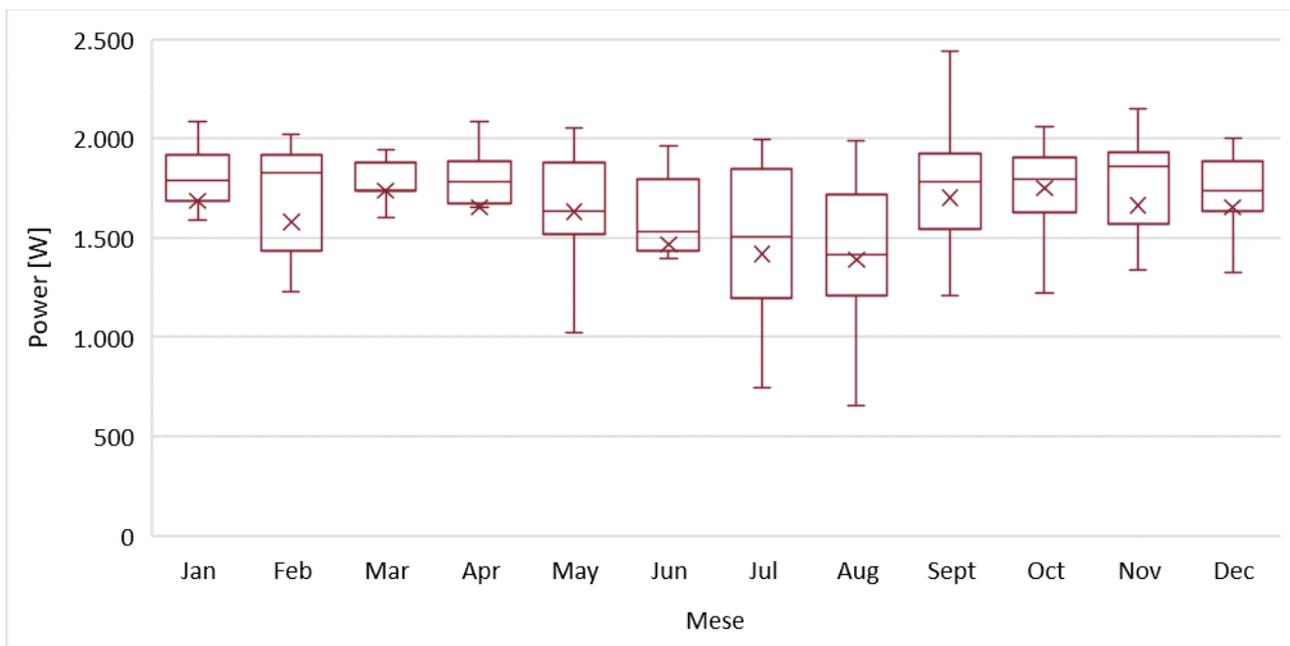


Figura 4.26 – PS: Scenario 3, valori medi mensili.

Il trend si conferma anche nello scenario S4 (Figura 4.27), in cui si osserva anche una lieve riduzione dei valori massimi, e di conseguenza, una riduzione nei valori mediani e nella media annuale che passa da 1777 W dello scenario S1 a 1600 W dello scenario S4.

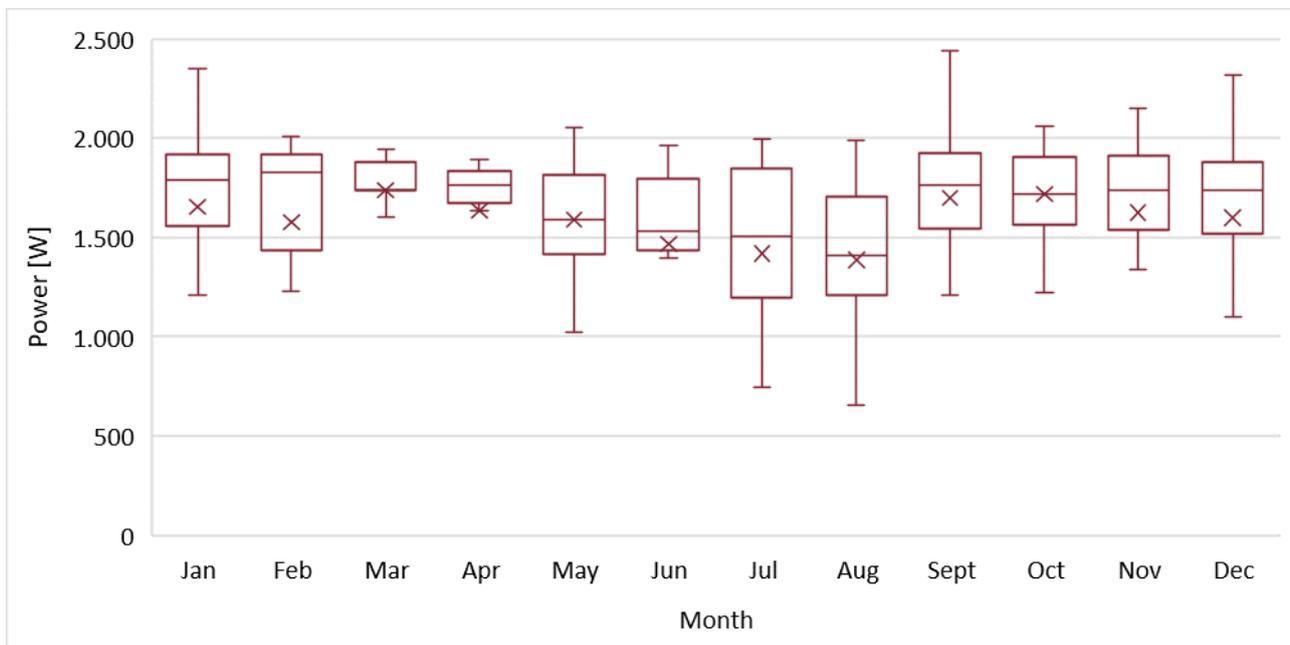


Figura 4.27 – PS: Scenario 4, valori medi mensili.

4.3 Metodologia e simulazione della strategia di riduzione dei picchi di prelievo dalla rete elettrica basata sull'ottimizzazione del fotovoltaico e dello stoccaggio: un caso di studio nel settore residenziale italiano

4.3.1 Introduzione

Il foglio di calcolo usato per la simulazione energetica delle abitazioni è in continua evoluzione, al fine di rispondere al meglio alle esigenze per le quali è stato predisposto.

Una delle funzioni aggiunte di recente consente di simulare la presenza di un impianto fotovoltaico con batteria di accumulo.

Nello spirito del foglio di calcolo, l'immissione dei dati è accompagnata da suggerimenti utili alla compilazione; tra i suggerimenti che vengono offerti all'utente ci sono la potenza dell'impianto fotovoltaico e la capacità della batteria di accumulo.

Al fine di fornire suggerimenti corretti sono state effettuate delle simulazioni volte ad individuare la taglia ottimale dell'impianto e della batteria di accumulo in un contesto di aggregazione di utenze, come potrebbe essere un condominio.

La base di partenza per le simulazioni sono stati i dati di consumo delle 14 unità abitative, oggetto della campagna di monitoraggio.

Questo parte della ricerca ha quindi come obiettivo la definizione di una metodologia che supporti l'analisi e la progettazione di un sistema di produzione, autoconsumo e stoccaggio, al servizio di un aggregato di utenti residenziali, al fine di raggiungere un'ottimizzazione della domanda di energia elettrica.

In particolare, l'obiettivo è quello di ottenere un Peak Shaving della curva di potenza della domanda elettrica, impostando un limite al massimo assorbimento di energia dalla rete, e fornendo il resto del fabbisogno energetico dell'utente attraverso un sistema di accumulo di energia elettrica, caricato dall'impianto fotovoltaico durante il tempo di sovrapproduzione giornaliero.

4.3.2 Metodologia

I dati ottenuti dal monitoraggio sono stati aggregati per ottenere un profilo di carico cumulato delle 14 abitazioni: tramite un foglio di calcolo sviluppato in ambiente Excel-VBA, sono state effettuate alcune simulazioni, variando i parametri di progettazione dei sistemi fotovoltaici e di accumulo, per l'aggregato delle 14 abitazioni.

Le simulazioni sono state condotte considerando i seguenti vincoli:

- autoconsumo da fotovoltaico finché la produzione è simultanea alla domanda aggregata del carico;
- fornitura dalla rete pubblica, al netto dell'autoconsumo, finché l'assorbimento di potenza è entro il limite massimo fissato;
- caricamento dell'accumulo, soltanto da fotovoltaico, nei momenti in cui la produzione è superiore alla domanda;
- cessione alla rete dell'energia prodotta in surplus rispetto alla domanda interna (carichi aggregati e batterie di accumulo);
- alimentazione dalle batterie di accumulo per la parte di domanda di energia che supera il limite fissato, fino alla completa scarica dell'accumulo.

La simulazione mira a valutare il Peak Shaving del profilo di potenza di assorbimento dell'aggregato: in particolare, la curva di carico non deve superare il limite fissato in termini di potenza.

L'efficacia della strategia è stata valutata attraverso l'utilizzo di un indicatore "Numero di Picchi Evitati": per Picco Evitato in questo caso si intendono quegli intervalli temporali di 15 minuti del monitoraggio reale (prima

delle simulazioni) che presentano una richiesta di potenza superiore alla soglia, e che, dopo le simulazioni, rientrano nel limite di potenza fissato.

Gli effetti utili considerati nelle simulazioni sono:

- percentuale di riduzione dei picchi, cioè il numero di picchi di potenza della domanda, in percentuale, che sono stati gestiti per rimanere sotto il limite fissato;
- la quantità di energia venduta alla rete;
- la quantità evitata di energia acquistata, cioè l'autoconsumo.

Il limite fisso, al di sotto del quale i picchi devono rimanere, è una soglia imposta in termini di potenza massima di assorbimento dalla rete, e rappresenta l'ipotetico valore massimo misurato al POC aggregato (Point of Connection; l'interfaccia di rete) oltre il quale l'accumulo inizia ad alimentare il carico.

Questo significa per esempio che, se il limite è fissato a 6000 W, finché la domanda di carico è inferiore alla soglia, l'energia proviene dalla rete, o dal fotovoltaico (se c'è produzione simultanea); quando la domanda è superiore alla soglia, l'eccedenza tra il limite e la domanda di potenza necessaria sarà fornita dalla batteria, e la potenza assorbita dalla rete rimane costante a 6000 W.

Le variabili considerate sono le seguenti, all'interno degli intervalli indicati:

- potenza nominale di picco dell'impianto fotovoltaico, tra 3 kW e 30 kW;
- capacità del sistema di stoccaggio installato, tra 5 kWh e 25 kWh;
- potenza massima di assorbimento dalla rete, tra 4000 W e 8000 W.

Lo studio è stato condotto su due mesi, identificati come significativi per le stagioni invernale ed estiva (gennaio e giugno) scegliendo, per ognuno dei due mesi, la settimana caratterizzata dalla temperatura più estrema. Così facendo, la settimana estiva mostra un maggiore utilizzo dei sistemi di raffreddamento degli spazi abitativi, ma anche una produzione FV molto elevata, mentre nella settimana invernale il consumo è in linea con il resto dell'anno, ma la produzione FV è molto bassa.

Il consumo dell'aggregato nella settimana estiva è stato di 784 kWh, mentre in quella invernale di 592 kWh, con un aumento del 32% in estate, dovuto all'utilizzo dei sistemi di raffrescamento.

In Figura 4.28 è presentato un diagramma a blocchi della logica del processo di simulazione.

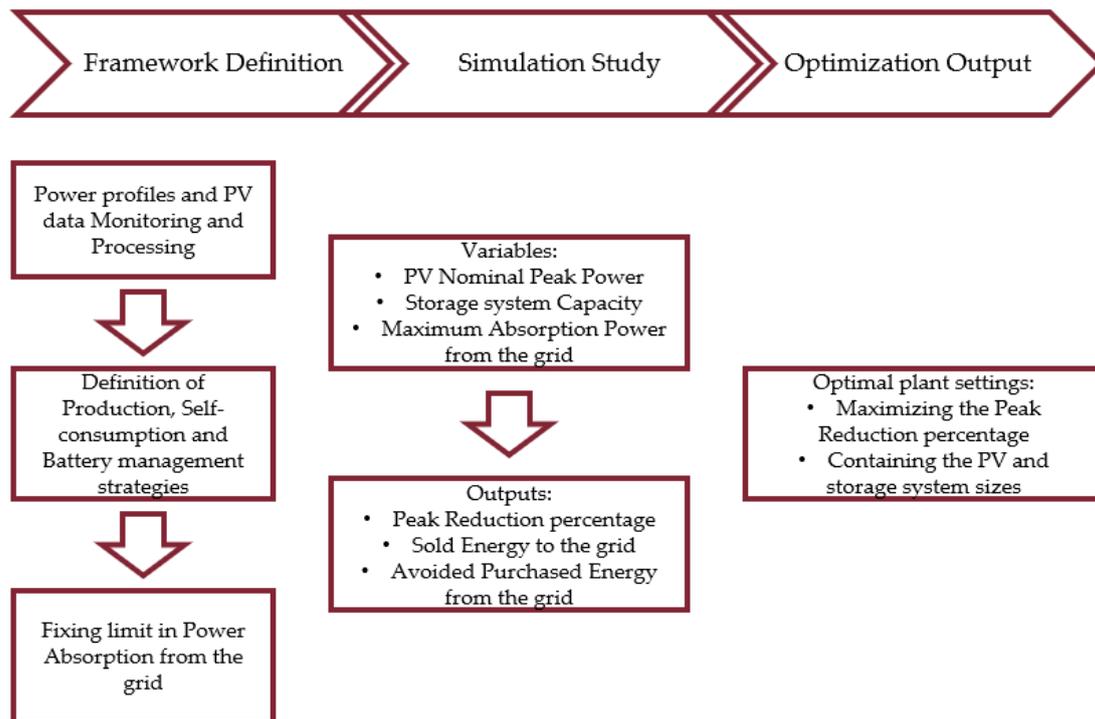


Figura 4.28 – Diagramma a blocchi della logica di simulazione: descrizione del processo in tre fasi.

4.3.3 Risultati delle simulazioni e discussione

In questa sezione, sono presentati i risultati delle simulazioni associate alla strategia di Peak Shaving analizzata. Variando alternativamente in modo discreto le tre variabili focalizzate (potenza nominale FV, capacità di stoccaggio e potenza massima di assorbimento), vengono simulati i comportamenti dell'aggregato con le impostazioni tecniche dell'impianto.

Di seguito viene presentato un particolare comportamento del sistema, per mostrare il tipo di strategia che è stata simulata. In Figura 4.29 il profilo di carico monitorato (senza strategia) è presentato con la linea verde tratteggiata e lo stesso profilo con l'applicazione della strategia è con la linea rossa.

La strategia applicata in questo caso consiste in una limitazione dell'assorbimento di potenza a 6000 W, un impianto fotovoltaico di 15 kW, e una capacità di stoccaggio di 10 kWh, in una settimana di gennaio. Inoltre, si mostra come la strategia permetta la riduzione dell'assorbimento di potenza dalla rete solo per i picchi che superano la soglia massima fissata e, ovviamente, permette di ridurla anche quando la produzione fotovoltaica è elevata, ottenendo valori di Peak Shaving intorno a una media di 2400 W e fino a 4300 W.



Figura 4.29 – Profilo di assorbimento per l’aggregato delle 14 abitazioni in una settimana di gennaio: prima (verde) e dopo (rosso) l’applicazione della strategia.

Nei grafici che seguono, sono presentati i risultati delle simulazioni effettuate; in particolare è riportato l’andamento dell’indicatore Peak Reduction Percentage (sull’asse y) in funzione della potenza nominale PV (sull’asse x), in funzione di tre valori di capacità dell’accumulo (5, 10, 15 kWh) e per diverse soglie di potenza massima di assorbimento dalla rete: 4000 W, 6000 W e 8000 W.

In Figura 4.30 (soglia di potenza 4000 W) è possibile notare come il profilo della Peak Reduction Percentage segua una funzione crescente logaritmica che tenda a "saturarsi", cioè a mostrare minimi incrementi percentuali cumulativi, intorno ai 12-15 kW di impianto fotovoltaico, con andamenti analoghi per le tre diverse taglie di capacità dell’accumulo.

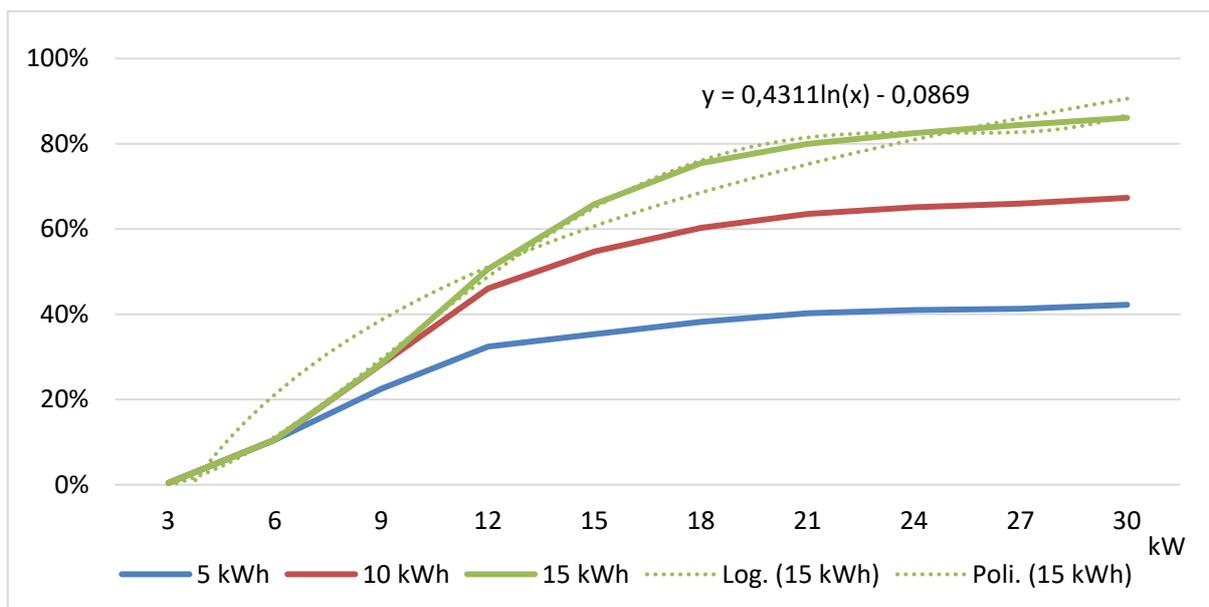


Figura 4.30 – Peak Reduction Percentage Result for Maximum Power limit of 4000 W.

La Figura 4.31 riporta i profili dell'energia venduta alla rete (Sold Energy to Grid) e dell'energia acquistata evitata dalla rete (Avoided Purchased Energy, cioè autoconsumata).

La vendita di energia, chiaramente maggiore per gli accumuli più piccoli, aumenta all'aumentare delle dimensioni degli impianti fotovoltaici e tende ad essere lineare oltre i 15 kW. La linearizzazione significa che la percentuale di aumento dei ricavi per la vendita è costante, e quindi la vendita è proporzionale alla potenza installata. L'andamento dell'Avoided Purchased Energy segue l'andamento della Peak Reduction Percentage, mostrando una saturazione per valori di potenza dell'impianto fotovoltaico superiori a 15-18 kW: questo perché per questi valori l'autoconsumo contemporaneo alla produzione è maggiore.

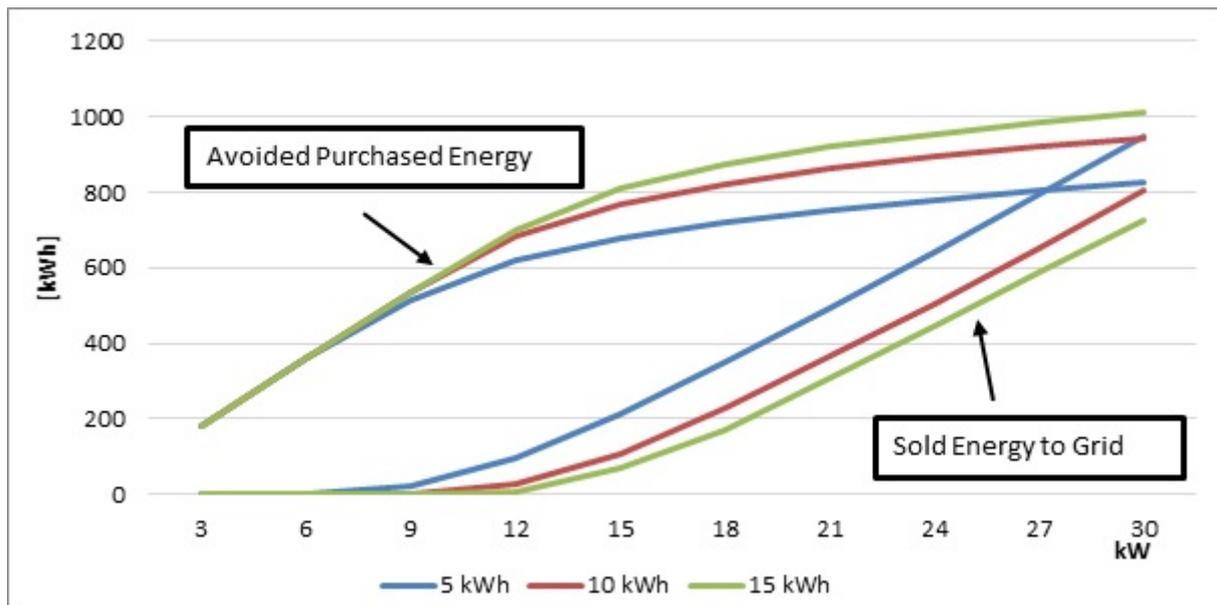


Figura 4.31 – Peak Shaving Strategy Results for Maximum Power limit of 4000 W.

In Figura 4.32, per il caso in cui il limite di potenza massima sia impostato a 6000 W, sono riportati gli andamenti di Peak Reduction, di Avoided Purchased Energy e di Sold Energy to Grid, con diversa scala dell'asse y (% a sinistra; kWh a destra).

Le considerazioni precedenti sono sempre valide; inoltre, è possibile notare come all'aumentare della massima potenza assorbita, la differenza tra le capacità di accumulo abbia un basso impatto sulle tre proprietà indagate, e quindi la dipendenza dalla dimensione della batteria risulti bassa, e la saturazione avvenga più rapidamente.

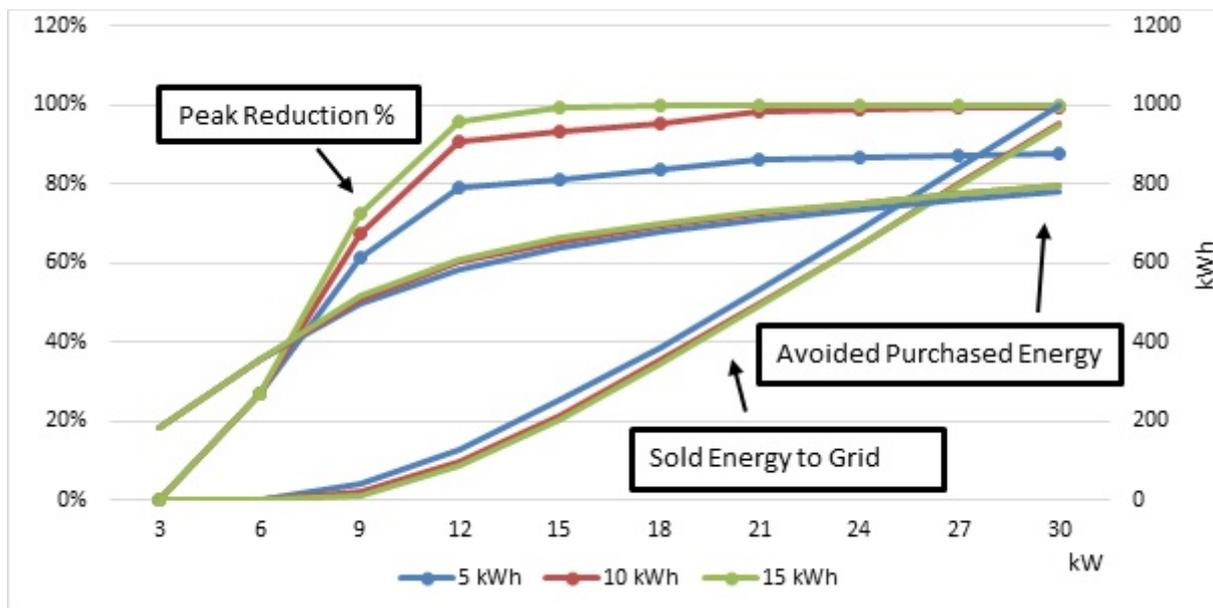


Figura 4.32 – Peak Shaving Strategy Results for Maximum Power limit of 6000 W.

In Figura 4.33, per il caso in cui il limite di potenza massima sia impostato a 8000 W, sono riportati gli andamenti di Peak Reduction, di Avoided Purchased Energy e di Sold Energy to Grid, con diversa scala dell’asse y (% a sinistra; kWh a destra).

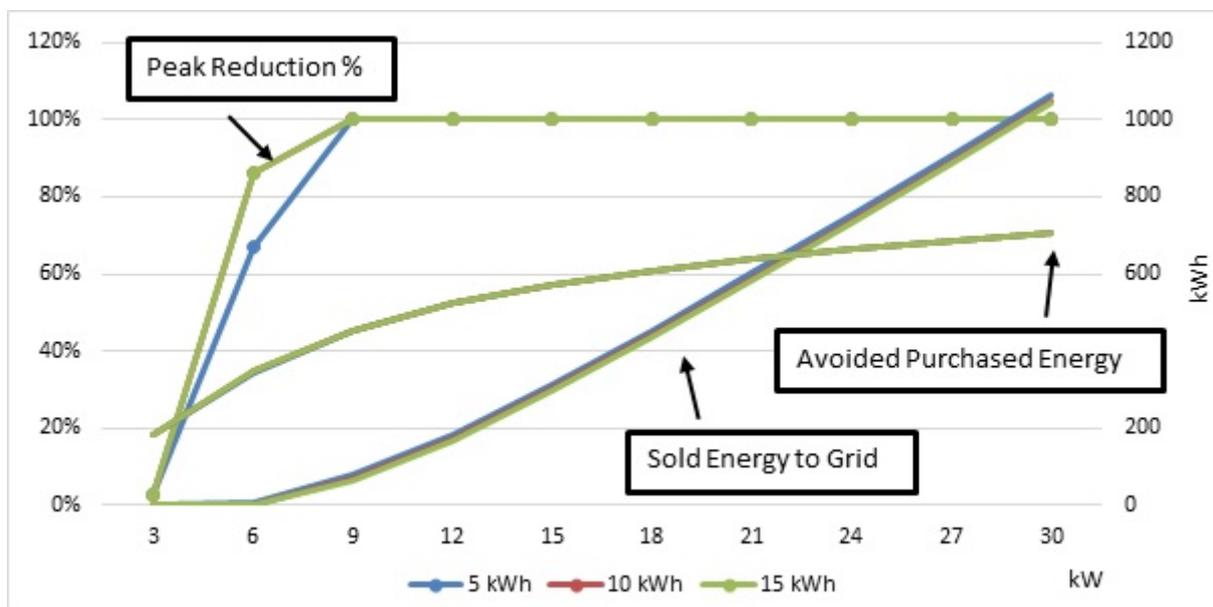


Figura 4.33 – Peak Shaving Strategy Results for Maximum Power limit of 8000 W.

È possibile notare come all’aumentare della potenza massima assorbita, la saturazione della curva si verifichi a bassi valori di Potenza Nominale FV (12 kW a 6000 W e 9 kW a 8000 W), in conseguenza del fatto che un limite di Potenza maggiore implica meno energia da fornire dall’accumulo, e quindi, una maggiore possibilità di fornire tutti i picchi ed evitare il superamento del limite di potenza massima; questo comportamento è più accentuato con una maggiore capacità di stoccaggio.

Aumentando la potenza nominale dell’impianto fotovoltaico, l’autoconsumo e la vendita di energia aumentano; d’altra parte, non c’è un alto aumento della Riduzione di Picco che possa giustificare una potenza

maggiore: in vista di un approccio di costo minimo per l'obiettivo della Riduzione di Picco, è più importante quando la curva del Profilo di Picco inizia a saturarsi.

Di seguito, nella Figura 4.34, viene fornito un confronto tra i tre casi studio di assorbimento massimo di potenza precedentemente mostrati, in termini di riduzione dei picchi; questo confronto è utile per analizzare e trarre considerazioni e scelte conclusive.

Le linee blu si riferiscono ad una limitazione di potenza di 8000 W, quelle rosse ad una di 6000 W e quelle verdi a 4000 W. Le diverse tonalità di colore rappresentano le diverse dimensioni di Capacity Storage.

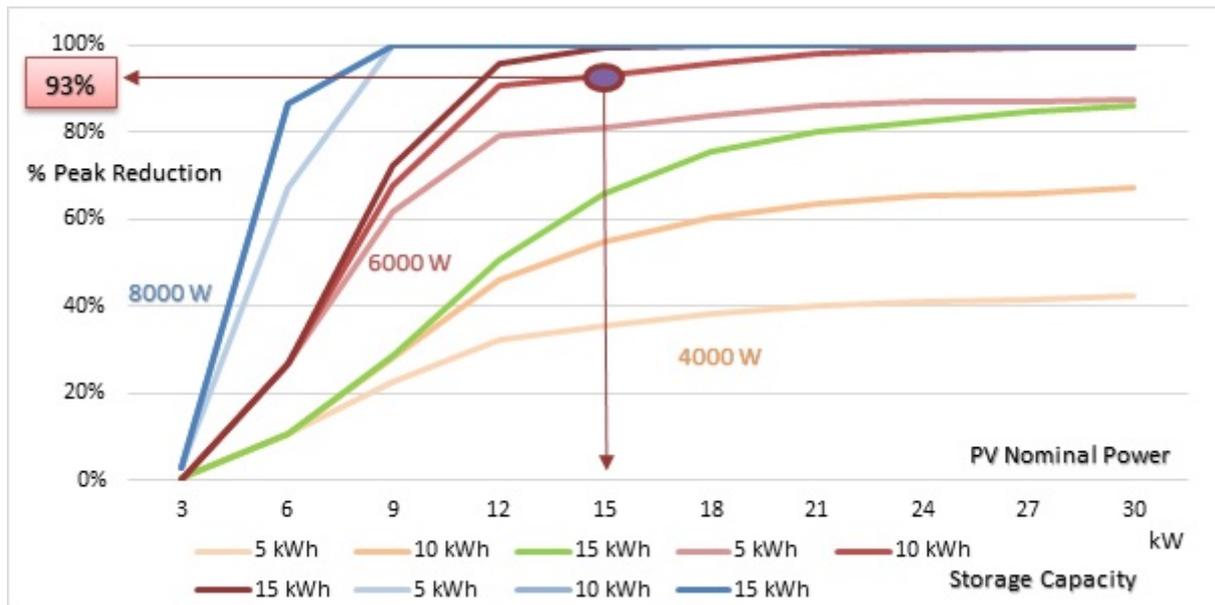


Figura 4.34 – Peak Reduction Percentage Comparison between different Maximum Power limit for January case.

Concludendo, le soluzioni migliori, al fine di ottimizzare il dimensionamento del sistema (fotovoltaico ed accumulo), sono:

- se l'obiettivo è quello di raggiungere un limite di potenza di 8000 W, una potenza FV di 9 kW e una capacità di stoccaggio di 5 kWh;
- se l'obiettivo è quello di raggiungere un limite di potenza di 6000 W, una potenza FV di 12-15 kW e un accumulo di 10-15 kWh;
- se l'obiettivo è quello di raggiungere un limite di potenza di 4000 W, sono necessari una potenza fotovoltaica e una capacità di immagazzinamento più elevate, oltre i limiti della simulazione effettuata.

Escludendo il caso da 4000 W, in quanto costoso e poco efficiente per gli obiettivi discussi, i casi da 8000 W e da 6000 W saranno quindi una scelta dipendente dalle esigenze della rete su cui l'impianto opera e dagli obiettivi dell'ipotetico Aggregatore.

Supponendo che alcuni picchi non possano essere ridotti entro il limite di potenza imposto, la migliore impostazione dell'impianto che permette un buon compromesso tra i benefici ambientali, i benefici ottenibili dalla rete e i benefici dell'utente (risparmio energetico e vendita) sarebbe la seguente: una limitazione dell'assorbimento di potenza a 6000 W, un impianto fotovoltaico di 15 kW e una capacità di accumulo di 10 kWh. Inoltre, è importante notare che le presenti simulazioni sono state condotte durante il mese di gennaio, quando le condizioni meteorologiche non sono ottimali in termini di produzione fotovoltaica.

La stessa analisi è stata condotta durante il mese di giugno utilizzando i consumi elettrici aggregati che presentano una maggiore domanda di energia, soprattutto a causa dell'uso dei sistemi di raffrescamento degli spazi (condizionatori).

I risultati sono in gran parte simili a quelli ottenuti per il caso invernale, con qualche differenza.

La Figura 4.35 mostra il grafico con i tre limiti massimi di assorbimento di potenza che sono stati considerati, similmente a quanto mostrato nella Figura 4.34.

Le linee blu si riferiscono a una limitazione di potenza di 8000 W, quelle rosse a una di 6000 W e quelle verdi a 4000 W. Le diverse tonalità di colore rappresentano le diverse dimensioni della capacità di stoccaggio, da 5 a 15 kWh.

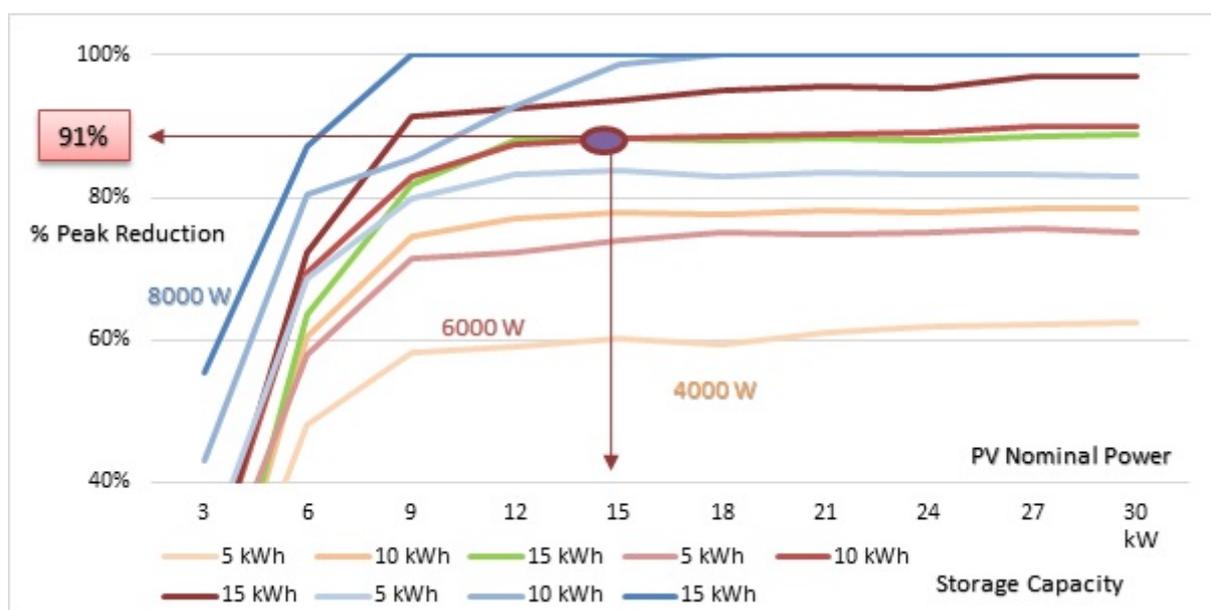


Figura 4.35 – Peak Reduction Percentage Comparison between different Maximum Power limit for June case.

La differenza principale tra il caso invernale e quello estivo è che quasi tutte le curve si saturano a valori PV approssimativamente più bassi (intorno ai 9 kW); questo è dovuto al fatto che lo studio è stato condotto nel mese estivo e quindi la capacità produttiva dell'impianto da 9 kW è simile a quella di un impianto da 15 kW durante i mesi invernali; inoltre, i valori di energia venduta e autoconsumata aumentano, anche se il consumo di energia aumenta anche a causa dell'uso di sistemi di condizionamento.

È anche importante notare la maggiore deviazione tra le diverse dimensioni di stoccaggio, perché ogni volta che c'è una maggiore produzione di energia, un maggiore stoccaggio di energia è in grado di accumulare più energia, e quindi affrontare picchi di potenza più elevati, come quelli richiesti dall'uso di condizionatori d'aria.

4.4 Considerazioni di riepilogo e conclusive

In questo paragrafo, al fine di valutare il contributo che il settore residenziale italiano può dare ad un'attività di Demand Response, è stata definita una metodologia volta all'aggregazione dei dati, che consentisse di ottenere un cluster di abitazioni che fosse rappresentativo di tutto il database.

La procedura ottenuta per costruire un profilo di carico per il cluster di abitazioni è basata su un approccio combinato che integra le misure sperimentali ad un'analisi statistica, sfruttando la larga disponibilità di dati simulati. Facendo riferimento al contesto italiano, tale approccio potrebbe rappresentare una buona opportunità, da un lato per aggiornare i dati disponibili, dall'altro per sviluppare nuovi modelli per la gestione della rete elettrica.

I dati aggregati ottenuti grazie all'applicazione della procedura sono stati utilizzati quindi per:

1. definire una procedura per l'aggregazione virtuale delle utenze ed elaborare una strategia di flessibilità utile al sistema elettrico italiano;
2. valutare il reale potenziale di flessibilità che le abitazioni possono offrire, in funzione di vincoli imposti e in dipendenza delle necessità del sistema elettrico italiano;
3. definire una metodologia per individuare il dimensionamento ottimale di un impianto fotovoltaico con accumulo, finalizzata alla riduzione dei picchi di domanda elettrica.

I risultati delle elaborazioni effettuate possono così essere sintetizzati:

1. l'applicazione delle attività DR al settore residenziale rappresenta un'opzione praticabile per ottenere un beneficio sia per le utility che per gli utenti finali; la creazione di un cluster di abitazioni consente di arrivare a enormi quantità di carichi flessibili da spostare durante il giorno, al fine di partecipare attivamente ad un programma di DR; prendendo il settore residenziale italiano come caso di riferimento e l'andamento italiano dei prezzi dell'elettricità nel 2018 e 2019, è stato possibile definire una strategia di gestione dei carichi flessibili;
2. la quantificazione del potenziale di flessibilità di un'abitazione non può essere effettuata utilizzando la sola classificazione teorica dei carichi; per arrivare alla quantificazione del reale potenziale di flessibilità è necessario considerare i dati reali delle misurazioni e applicare vincoli tecnici, vincoli di funzionamento e vincoli derivanti dalla particolare strategia di gestione; l'applicazione dei vincoli comporta una considerevole riduzione del potenziale di flessibilità reale che un cluster di edifici può fornire;
3. il dimensionamento ottimale di un impianto fotovoltaico segue logiche diverse in funzione dell'utenza servita; volendo ottimizzare il dimensionamento per un cluster di edifici o di utenze è necessario definire prima una metodologia di aggregazione e quindi stabilire gli obiettivi che si vogliono raggiungere in termini di risparmio (rivolto all'aggregato) e di servizio alla rete (ad. es. riduzione dei picchi).

5 Analisi di scenari evolutivi per le abitazioni – L'utilizzo dei climatizzatori a pompa di calore come generatore prioritario

Una delle funzioni aggiuntive al foglio di calcolo è stata introdotta per valutare il funzionamento dei climatizzatori domestici a pompa di calore come generatore prioritario di riscaldamento, ancorché non in grado di far fronte in maniera completa al fabbisogno di riscaldamento dell'abitazione.

Tale funzione aggiuntiva consente di considerare un'abitudine che si va sempre più diffondendo nel contesto residenziale italiano che è quella di affiancare i due sistemi di generazione del calore (ove entrambi presenti) al fine di compensare il carico termico invernale.

A partire dal database delle abitazioni, in cui per nessuna abitazione (in mancanza dell'opzione sul foglio di calcolo) è stato possibile considerare tale circostanza (**Scenario #R0**), sono state effettuate delle simulazioni volte a valutare gli effetti sui consumi energetici di:

1. utilizzo dei climatizzatori presenti come generatore prioritario di riscaldamento (**Scenario #R1**);
2. introduzione di un ulteriore climatizzatore in tutte le abitazioni e utilizzo dei climatizzatori come generatore prioritario di riscaldamento (**Scenario #R2**).

Quanto indicato al punto 2 rappresenta uno scenario evolutivo ulteriore che tiene conto di una tendenza piuttosto diffusa nel settore residenziale (sebbene finalizzata al comfort estivo) rappresentata dall'installazione di nuovi climatizzatori a pompa di calore.

Nei paragrafi che seguono sono illustrati i risultati delle simulazioni, focalizzando dapprima l'attenzione sui consumi di energia primaria per il riscaldamento invernale e sui carichi flessibili (accumulabili + differibili). Successivamente, utilizzando la procedura di aggregazione descritta in precedenza (cfr. par. 4.1.1), vengono ricostruite, per i tre scenari, le curve di carico al fine di evidenziare le criticità derivanti dal diverso impiego dei climatizzatori attuali e dall'introduzione di nuovi climatizzatori.

5.1 Scenario #R0 – Situazione attuale e utilizzo dei generatori a gas come generatore prioritario di riscaldamento

Come si è detto, la funzione che permette di simulare gli effetti dell'utilizzo dei climatizzatori come generatore prioritario per il riscaldamento è stata introdotta solo recentemente nel foglio di calcolo. Pertanto, tutte le simulazioni fin qui svolte non hanno potuto tenere in considerazione tale modalità di gestione degli impianti di riscaldamento.

Al fine di inquadrare al meglio gli scenari evolutivi, è stato preliminarmente considerato uno Scenario#R0 in cui il generatore prioritario è il generatore a gas e i climatizzatori eventualmente presenti non sono utilizzati come generatore per il riscaldamento.

Tale scenario rappresenta quindi un'ipotesi non confermata dai questionari, sebbene verosimile rispetto alle abitudini consolidate degli utenti residenziali, utile a costituire uno scenario di confronto per gli scenari evolutivi (Scenario #R1, Scenario#R2).

5.1.1 Consumi di energia primaria per riscaldamento e complessivi

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di energia primaria per riscaldamento, considerando il consumo per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

I consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie sono mediamente pari a 71,9 kWh/m²; il primo quartile ha consumi di energia primaria per unità di superficie inferiori a 34,5 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 60,8 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 98,3 kWh/m².

In Figura 5.1 e in Tabella 5.1, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

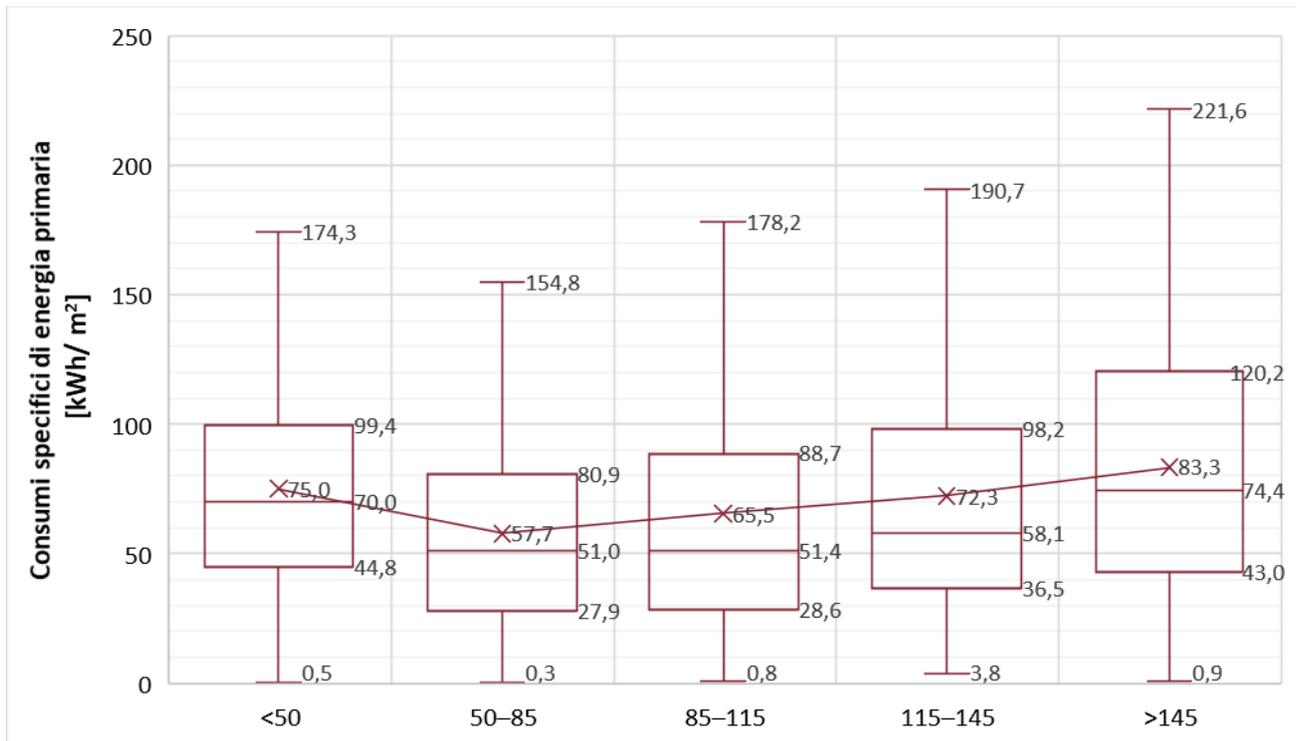


Figura 5.1 – Consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

Tabella 5.1 – Consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m²]
Abitazioni piccola (< 50 m ²)	75,0
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	57,7
Abitazioni medie (85-115 m ²)	65,5
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	72,3
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	83,3
Tutte le abitazioni	71,9

I consumi di energia primaria complessivi del database sono stati già descritti al paragrafo 2.4.3. La Tabella 5.2 riporta un riepilogo dei consumi per unità di superficie, in funzione delle classi dimensionali individuate.

Tabella 5.2 – Consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m²]
Abitazioni piccola (< 50 m ²)	254,7
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	182,8
Abitazioni medie (85-115 m ²)	167,2
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	154,4
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	133,3
Tutte le abitazioni	157,9

5.1.2 Carichi flessibili dell'abitazione

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei carichi elettrici flessibili (accumulabili + differibili), considerando i carichi flessibili per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

I carichi flessibili per unità di superficie sono mediamente pari a 9,4 kWh/m²; il primo quartile ha carichi flessibili per unità di superficie inferiori a 4,4 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 7,0 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 11,8 kWh/m².

In Figura 5.2 e in Tabella 5.3, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

I carichi elettrici flessibili per unità di superficie diminuiscono al crescere della dimensione dell'abitazione; in particolare, per piccole abitazioni i carichi flessibili specifici solo pari mediamente a 17,3 kWh/m², mentre per le grandi abitazioni i carichi flessibili specifici sono pari mediamente a 6,1 kWh/m².

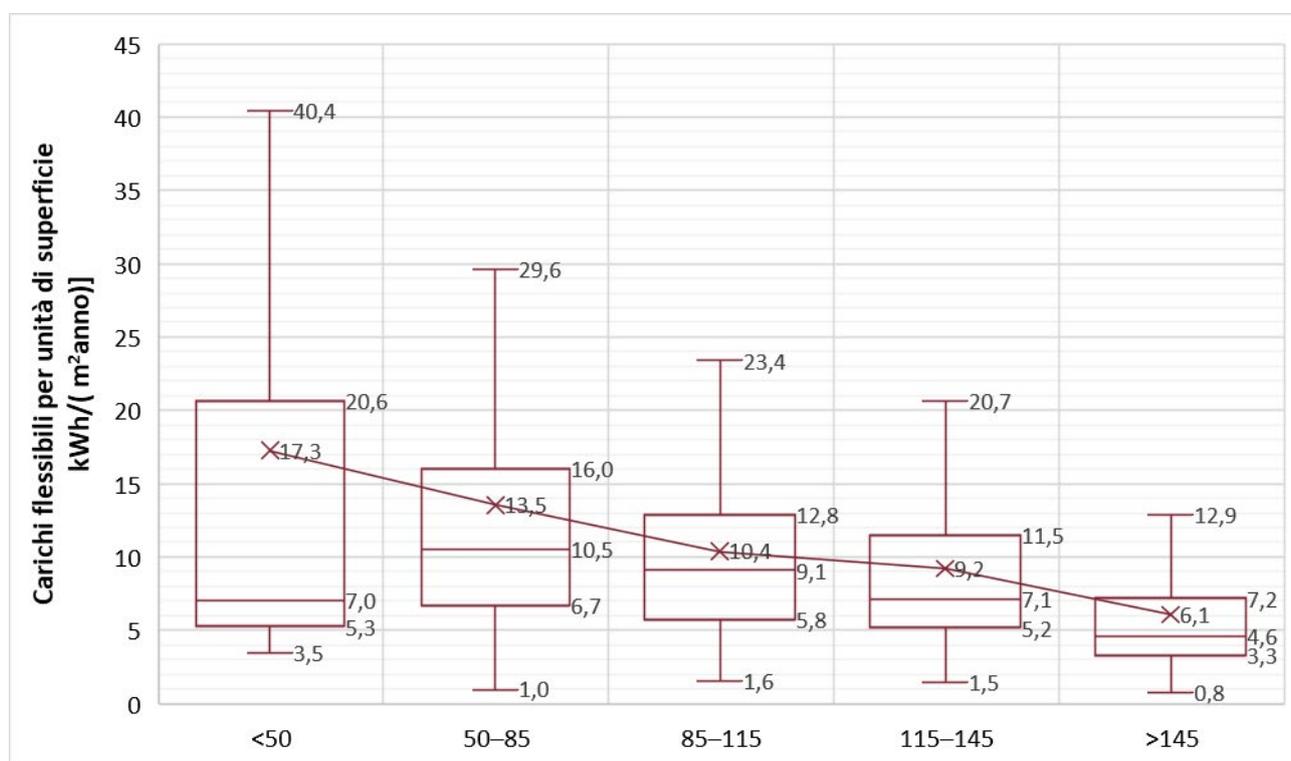


Figura 5.2 – Carichi flessibili per unità di superficie.

Tabella 5.3 – Carichi flessibili per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m ²]
Abitazioni piccola (<50 m ²)	17,3
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	13,5
Abitazioni medie (85-115 m ²)	10,4
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	9,2
Abitazioni grandi (>145 m ²)	6,1
Tutte le abitazioni	9,4

5.2 Scenario #R1 – Utilizzo dei climatizzatori presenti come generatore prioritario di riscaldamento

Lo Scenario#R0, considerato nel paragrafo precedente, è stato simulato considerando come generatore prioritario il generatore a gas e i climatizzatori eventualmente presenti non utilizzati come generatore per il riscaldamento. Partendo dalla situazione esistente, si sono voluti studiare gli effetti di un differente assetto dell’impianto di riscaldamento delle abitazioni del database, con utilizzo prioritario delle pompe di calore come generatore di riscaldamento.

Tale diverso assetto dell’impianto di riscaldamento interessa ovviamente solo le abitazioni in cui è già presente almeno un climatizzatore; come già illustrato in precedenza, tra le abitazioni considerate, solo in 677 abitazioni (43,8% del totale) è presente almeno un climatizzatore con un numero medio di stanze climatizzate pari a 2,7; solo il 20,8% delle abitazioni ha un numero di stanze climatizzate superiore a 3.

5.2.1 Consumi di energia primaria per riscaldamento e complessivi

Per lo Scenario #R1, è stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di energia primaria per riscaldamento, considerando il consumo per unità di superficie per le classi dimensionali individuate.

Per questo scenario, i consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie sono mediamente pari a 67,8 kWh/m², con una diminuzione del 5,7% rispetto allo scenario #R0; il primo quartile ha consumi di energia primaria per unità di superficie inferiori a 30,7 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 54,6 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 93,3 kWh/m².

In Figura 5.3 e in Tabella 5.4, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

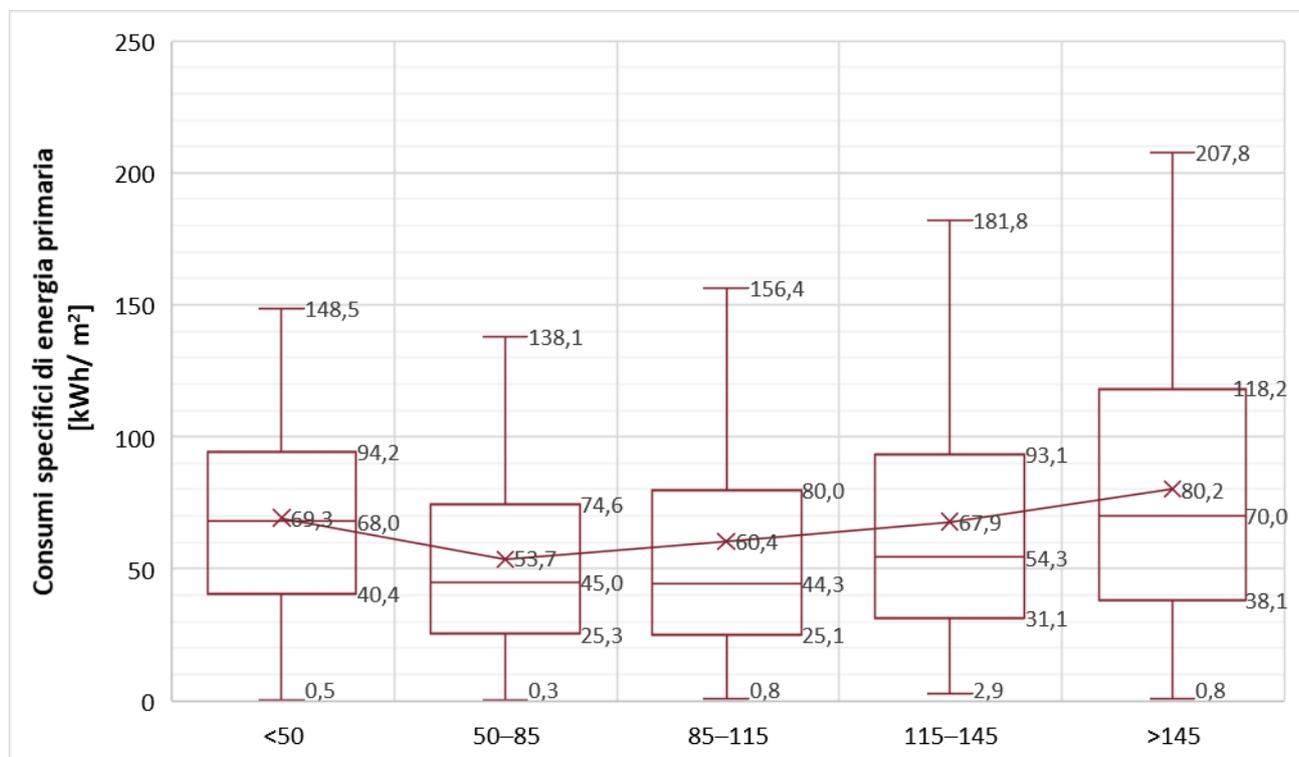


Figura 5.3 – Consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

Tabella 5.4 – Consumi energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m²]	Scenario #R1 [kWh/m²]	Differenza [%]
Abitazioni piccola (< 50 m ²)	75,0	69,3	-7,6%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	57,7	53,7	-6,9%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	65,5	60,4	-7,8%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	72,3	67,9	-6,1%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	83,3	80,2	-3,7%
Tutte le abitazioni	71,9	67,8	-5,7%

Come visto, l’utilizzo dei climatizzatori presenti come generatore prioritario comporta una diminuzione dei consumi di energia primaria per riscaldamento che si riflette sui consumi di energia primaria complessivi dell’abitazione in ragione dell’importanza di questi ultimi.

Per lo Scenario #R1, i consumi di energia primaria per unità di superficie risultano mediamente pari a 153,8 kWh/m², con una diminuzione del 2,6% rispetto allo scenario #R0; il primo quartile ha consumi di energia primaria per unità di superficie inferiori a 116,7 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 147,8 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 185,8 kWh/m². In Figura 5.4 e in Tabella 5.5, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

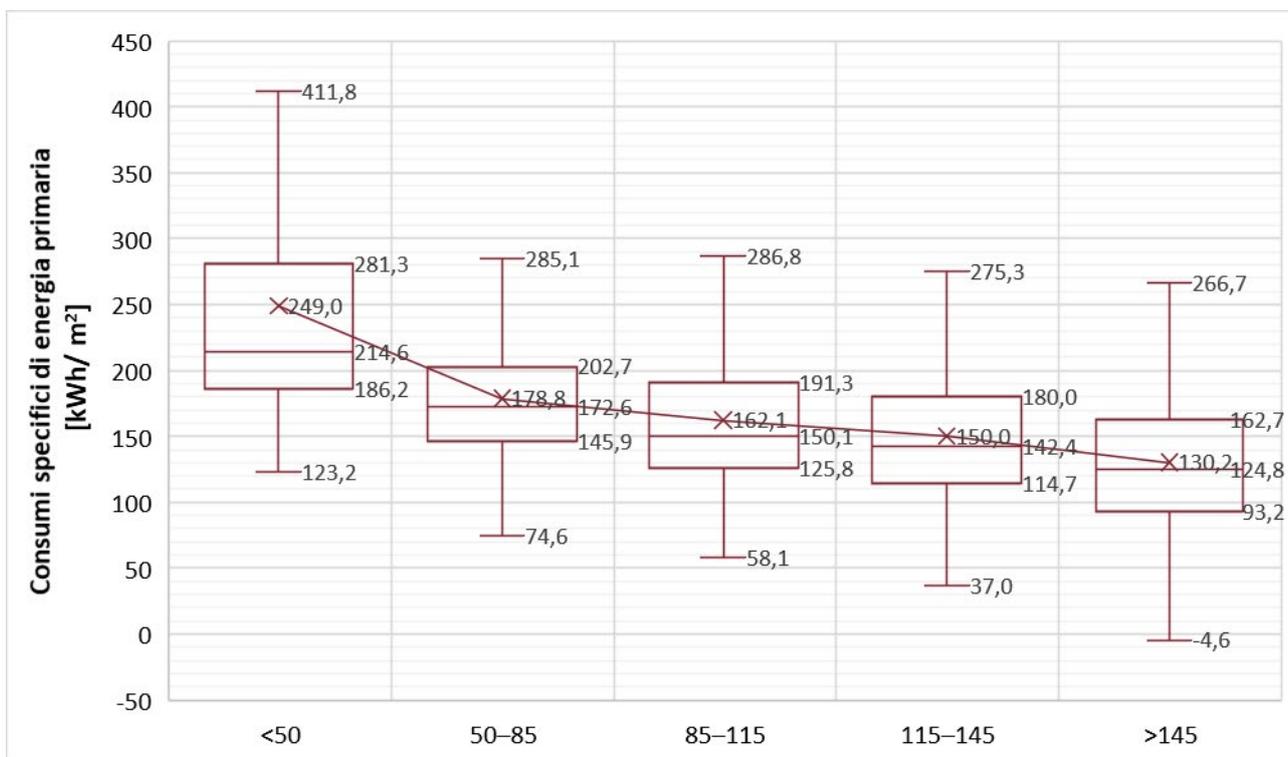


Figura 5.4 – Consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

Tabella 5.5 – Consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m²]	Scenario #R1 [kWh/m²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	254,7	249,0	-2,2%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	182,8	178,8	-2,2%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	167,2	162,1	-3,1%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	154,4	150,0	-2,8%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	133,3	130,2	-2,3%
Tutte le abitazioni	157,9	153,8	-2,6%

5.2.2 Emissioni inquinanti dell'abitazione

Per lo Scenario #R1, è stata effettuata anche una valutazione parametrica delle emissioni inquinanti complessive, considerando le emissioni inquinanti per unità di superficie per le classi dimensionali individuate.

Per questo scenario, le emissioni inquinanti per unità di superficie risultano mediamente pari a 26,1 kg/m², con una diminuzione del 3,4% rispetto allo scenario #R0; il primo quartile ha emissioni inquinanti per unità di superficie inferiori a 19,5 kg/m²; il secondo quartile inferiori a 25,0 kg/m²; il terzo quartile inferiori a 31,8 kg/m². In Figura 5.5 e in Tabella 5.6, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportate le emissioni inquinanti complessive per unità di superficie.

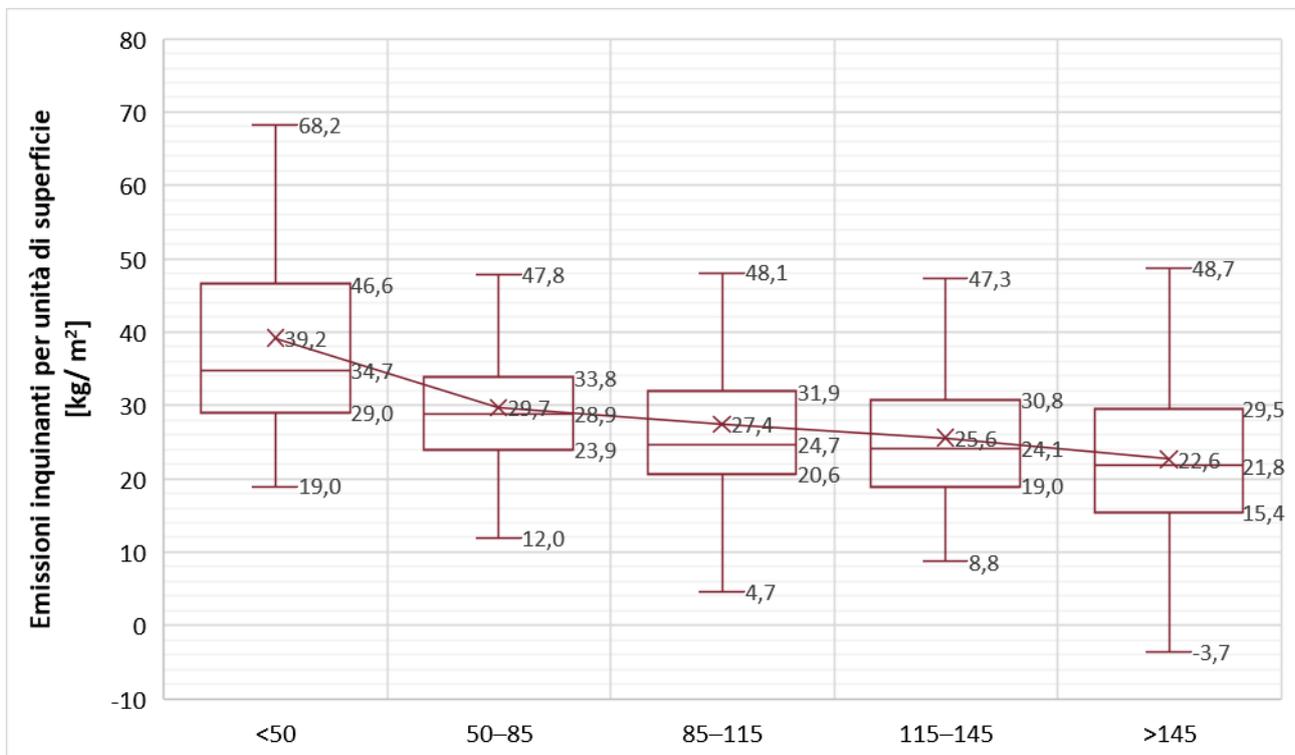


Figura 5.5 – Emissioni inquinanti per unità di superficie.

Tabella 5.6 – Emissioni inquinanti per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kg/m ²]	Scenario #R1 [kg/m ²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	40,5	39,2	-3,2%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	30,6	29,7	-2,9%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	28,5	27,4	-3,9%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	26,6	25,6	-3,8%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	23,4	22,6	-3,4%
Tutte le abitazioni	27,0	26,1	-3,4%

5.2.3 Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)

Per lo Scenario #R1, è stata effettuata una valutazione della quota di energia rinnovabile utilizzata nelle abitazioni, come rapporto tra i consumi di energia primaria coperti mediante FER e i consumi di energia primaria complessivi.

Per questo scenario, la quota di energia rinnovabile risulta mediamente pari al 10,2%, con una crescita del 2,2% rispetto allo scenario #R0, dovuta all'utilizzo della rinnovabile aerotermica e al maggior utilizzo (autoconsumo) dell'energia elettrica generata dagli impianti fotovoltaici, ove presenti; il primo quartile delle abitazioni impiega FER per una quota inferiore al 6,1%; il secondo quartile per una quota inferiore al 9,4%; il terzo quartile per una quota inferiore al 13,2%.

Al crescere della dimensione dell'abitazione (Figura 5.6, Tabella 5.7) diminuisce la quota di FER impiegata, sebbene in misura meno marcata rispetto a quanto osservato per lo Scenario #R0; per piccole abitazioni la quota di FER è mediamente pari al 12,6%, mentre per le grandi abitazioni la quota di FER è mediamente pari all'8,6%.

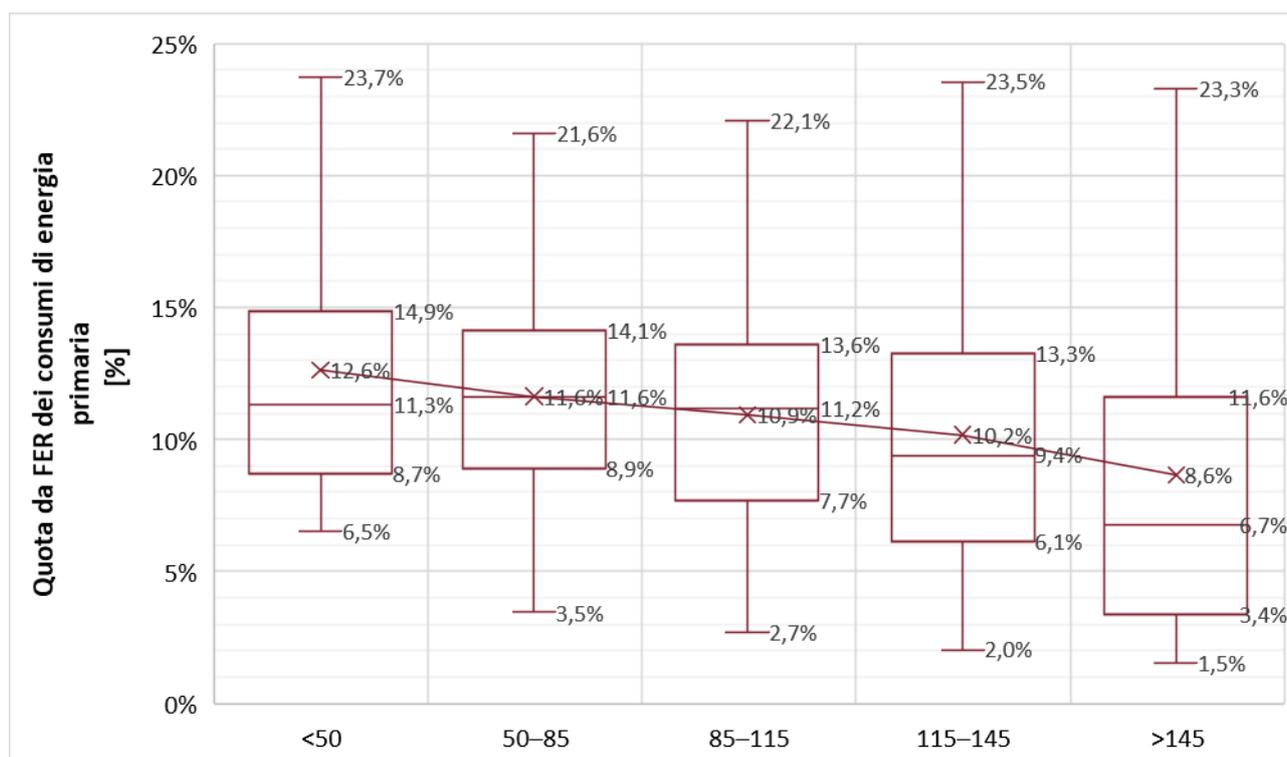


Figura 5.6 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione delle classi dimensionali individuate.

Tabella 5.7 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione delle classi dimensionali individuate.

	Scenario #R0	Scenario #R1	Differenza
	[%]	[%]	[%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	11,3%	12,6%	1,3%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	10,0%	11,6%	1,6%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	8,5%	10,9%	2,4%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	7,8%	10,2%	2,4%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	6,4%	8,6%	2,2%
Tutte le abitazioni	8,0%	10,2%	2,2%

Per lo Scenario #R1 l'energia complessivamente esportata rimane pari all'1,1% dei consumi complessivi di energia primaria delle abitazioni.

5.2.4 Carichi flessibili dell'abitazione

Per lo scenario #R1 è stata quindi effettuata una valutazione parametrica dei carichi elettrici flessibili (accumulabili + differibili), considerando i carichi flessibili per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

La diversa modalità di utilizzo dei climatizzatori comporta un trasferimento di parte dei carichi di riscaldamento dal vettore gas al vettore energia elettrica. Si ha, pertanto, un incremento dei consumi di energia elettrica, concentrato nei mesi invernali e conseguentemente un incremento dei carichi flessibili delle abitazioni, essendo il riscaldamento considerato un carico accumulabile.

La Tabella 5.8 riporta un confronto tra i consumi elettrici dell'abitazione media per i due scenari presi in considerazione.

Tabella 5.8 – Carichi elettrici mensili per l'abitazione media.

	Scenario #R0	Scenario #R1	Differenza
	[kWh]	[kWh]	[%]
Gennaio	261	310	19,0%
Febbraio	233	273	17,0%
Marzo	251	276	10,0%
Aprile	228	231	1,0%
Maggio	228	228	0,0%
Giugno	228	228	0,0%
Luglio	261	261	0,0%
Agosto	260	260	0,0%
Settembre	223	223	0,0%
Ottobre	228	228	0,2%
Novembre	242	263	8,7%
Dicembre	259	304	17,2%
Totale	2902	3085	6,3%

Per questo scenario, i carichi flessibili per unità di superficie sono mediamente pari a 10,8 kWh/m²; il primo quartile ha carichi flessibili per unità di superficie inferiori a 5,0 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 8,4 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 14,6 kWh/m².

In Figura 5.7 e in Tabella 5.9, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i carichi flessibili per unità di superficie.

I maggiori incrementi dei carichi flessibili si hanno per le abitazioni più grandi, per le quali si osserva un incremento dei carichi flessibili del 18,0%. Ciò è una conseguenza del fatto che le abitazioni più grandi hanno, con riferimento all'unità di superficie, una minore flessibilità iniziale; inoltre, per le abitazioni più grandi, è maggiore la probabilità di avere a disposizione un numero alto di climatizzatori.

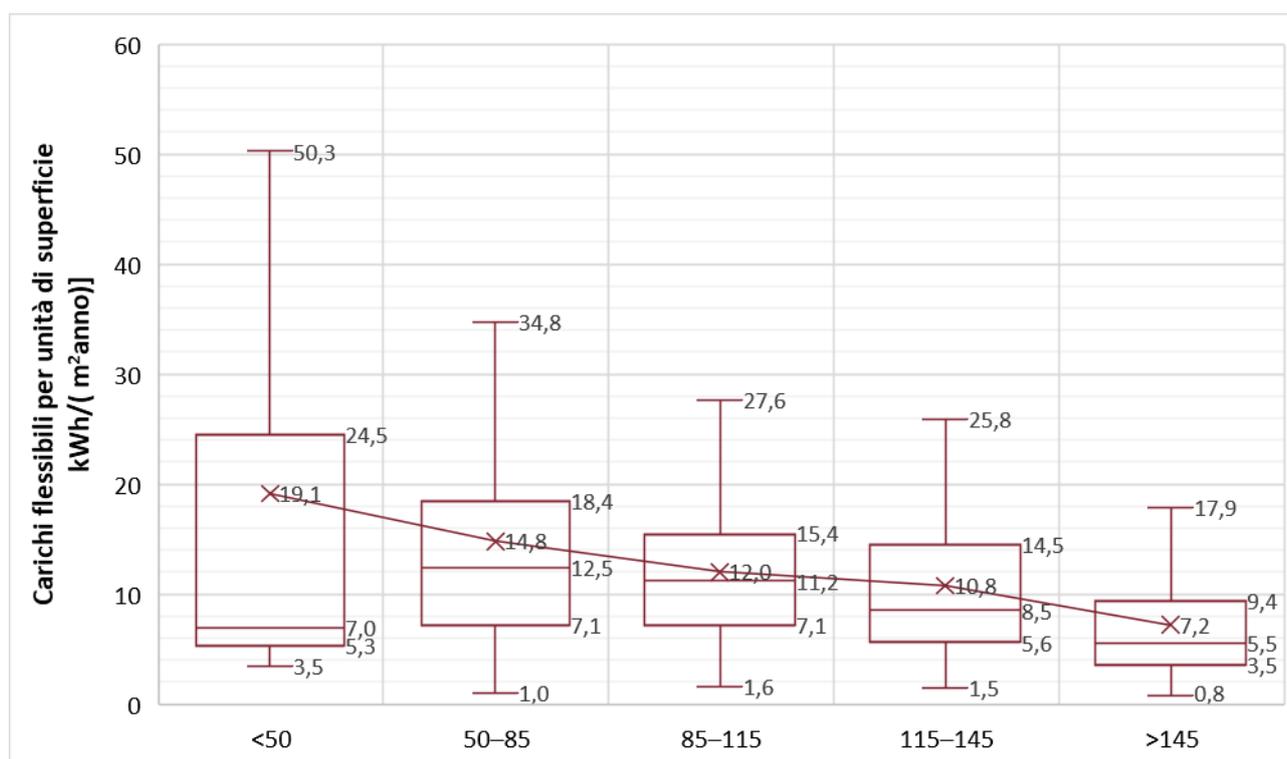


Figura 5.7 – Carichi flessibili per unità di superficie.

Tabella 5.9 – Carichi flessibili per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m ²]	Scenario #R1 [kWh/m ²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	17,3	19,1	10,4%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	13,5	14,8	9,6%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	10,4	12	15,4%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	9,2	10,8	17,4%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	6,1	7,2	18,0%
Tutte le abitazioni	9,4	10,8	14,9%

5.3 Scenario #R2 – Introduzione di un ulteriore climatizzatore in tutte le abitazioni e utilizzo dei climatizzatori come generatore prioritario di riscaldamento

Il seguente scenario simulato per l'intero database delle 1545 abitazioni prevede una semplice implementazione dell'impianto di climatizzazione, rappresentata dall'aggiunta di un climatizzatore.

Questo scenario, indicato come #R2, rappresenta uno scenario evolutivo ulteriore rispetto allo scenario #R1, e tiene conto di una tendenza piuttosto diffusa nel settore residenziale (sebbene finalizzata al comfort estivo) rappresentata dall'installazione di nuovi climatizzatori a pompa di calore.

Anche in questa simulazione, l'intero impianto di climatizzazione estivo è utilizzato come generatore prioritario per il riscaldamento degli ambienti rispetto all'impianto a gas, che attua unicamente un compito di compensazione.

L'aggiunta di un ulteriore climatizzatore rispetto alla situazione esistente è stata effettuata tenendo conto dei seguenti vincoli:

- il numero di climatizzatori complessivo deve essere al massimo pari al numero di stanze meno due;
- il numero di climatizzatori complessivo deve essere tale da non superare la densità di un climatizzatore ogni 20 m² di superficie dell'abitazione;
- ove non già superiore, il numero di climatizzatori non deve essere superiore a 4, al fine di non generare la necessità di cambio della potenza elettrica impegnata contrattualmente.

In considerazione dei vincoli esposti, i climatizzatori presenti nelle abitazioni sono complessivamente 3251, a partire da un numero iniziale (Scenario #R0 e Scenario #R1) di 1882; l'incremento è quindi di 1369 unità, ovvero 0,89 unità in più per abitazione.

Per questo scenario, aumentando il numero di climatizzatori presenti nelle abitazioni, vengono a variare non solamente i consumi associati al riscaldamento invernale degli ambienti, ma anche i consumi associati al raffrescamento estivo.

5.3.1 Consumi di energia primaria per riscaldamento e complessivi

Per lo Scenario #R2, è stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di energia primaria per riscaldamento, considerando il consumo per unità di superficie per le classi dimensionali individuate.

Per questo scenario, i consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie sono mediamente pari a 63,2 kWh/m², con una diminuzione del 12,1% rispetto allo scenario #R0; il primo quartile ha consumi di energia primaria per unità di superficie inferiori a 28,5 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 50,9 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 85,5 kWh/m².

In Tabella 5.10 e in Figura 5.8, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

Tabella 5.10 – Consumi energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m ²]	Scenario #R2 [kWh/m ²]	Differenza [%]
Abitazioni piccola (< 50 m ²)	75,0	56,2	-25,1%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	57,7	47,9	-17,0%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	65,5	55,5	-15,3%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	72,3	63,8	-11,8%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	83,3	76,7	-7,9%
Tutte le abitazioni	71,9	63,2	-12,1%

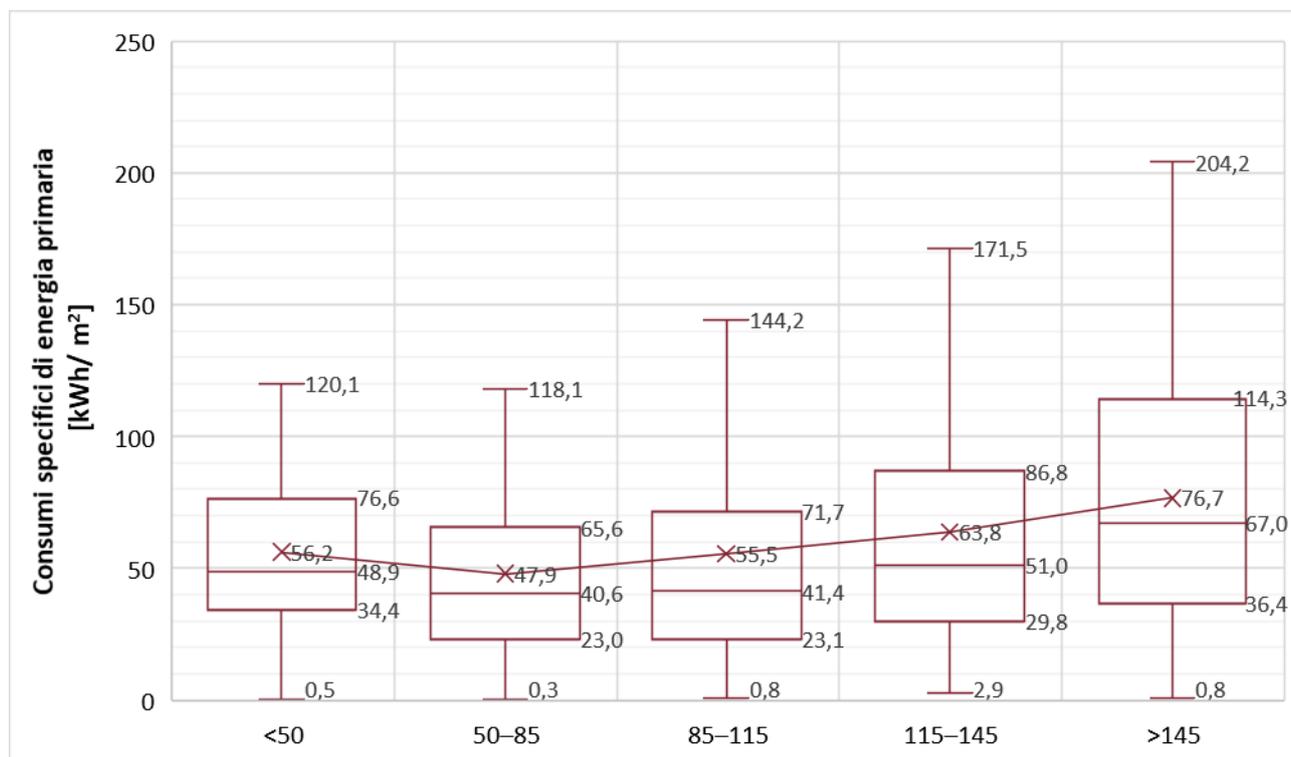


Figura 5.8 – Consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

Come visto, l’utilizzo dei climatizzatori presenti come generatore prioritario comporta una diminuzione dei consumi di energia primaria per riscaldamento che si riflette sui consumi di energia primaria complessivi dell’abitazione in ragione dell’importanza di questi ultimi.

Parallelamente, l’introduzione di un ulteriore climatizzatore comporta un forte incremento dei consumi di energia primaria per il raffrescamento estivo, mediamente pari al 52,4%, ma comunque piccolo in valori assoluti, in ragione della bassa incidenza dei consumi di raffrescamento sui consumi complessivi.

Tabella 5.11 – Consumi energia primaria per raffrescamento per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m²]	Scenario #R2 [kWh/m²]	Differenza [%]
Abitazioni piccola (< 50 m²)	6,3	9,9	57,1%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m²)	4,6	7,3	58,7%
Abitazioni medie (85-115 m²)	3,0	4,4	46,7%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m²)	2,0	3,1	55,0%
Abitazioni grandi (> 145 m²)	1,1	1,5	36,4%
Tutte le abitazioni	2,5	3,8	52,4%

L’effetto congiunto della diminuzione dei consumi di riscaldamento e dell’aumento dei consumi di raffrescamento è comunque una riduzione dei consumi di energia primaria complessivi.

Per lo Scenario #R2, i consumi di energia primaria per unità di superficie risultano mediamente pari a 150,6 kWh/m², con una diminuzione del 4,6% rispetto allo scenario #R0; il primo quartile ha consumi di energia primaria per unità di superficie inferiori a 115,3 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 146,2 kWh/m²; il terzo

quartile inferiori a 180,7 kWh/m². In Figura 5.9 e in Tabella 5.12, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

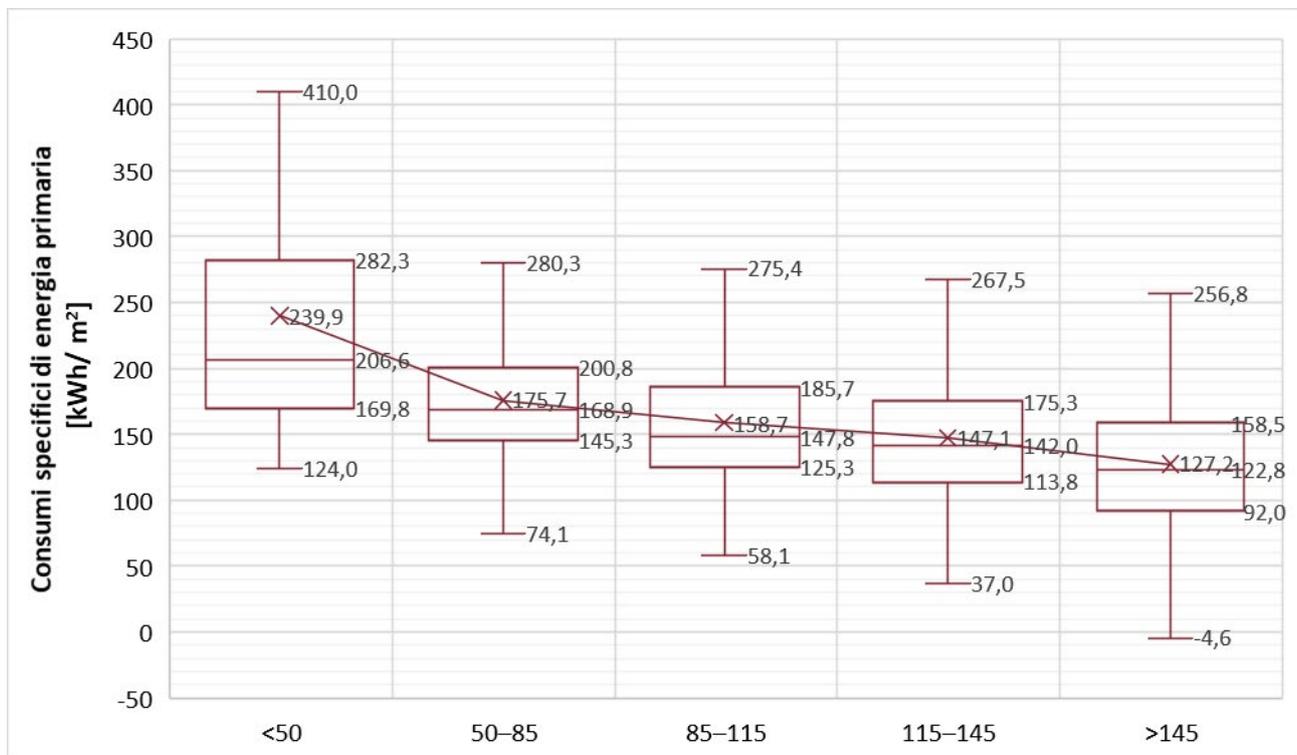


Figura 5.9 – Consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

Tabella 5.12 – Consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m ²]	Scenario #R2 [kWh/m ²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	254,7	239,9	-5,8%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	182,8	175,7	-3,9%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	167,2	158,7	-5,1%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	154,4	147,1	-4,7%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	133,3	127,2	-4,6%
Tutte le abitazioni	157,9	150,6	-4,6%

5.3.2 Emissioni inquinanti dell'abitazione

Per lo Scenario #R2, è stata effettuata anche una valutazione parametrica delle emissioni inquinanti complessive, considerando le emissioni inquinanti per unità di superficie per le classi dimensionali individuate.

Per questo scenario, le emissioni inquinanti per unità di superficie risultano mediamente pari a 25,2 kg/m², con una diminuzione del 6,6% rispetto allo scenario #R0; il primo quartile ha emissioni inquinanti per unità di superficie inferiori a 19,2 kg/m²; il secondo quartile inferiori a 24,2 kg/m²; il terzo quartile inferiori a 30,7 kg/m². In Figura 5.10 e in Tabella 5.13, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportate le emissioni inquinanti complessive per unità di superficie.

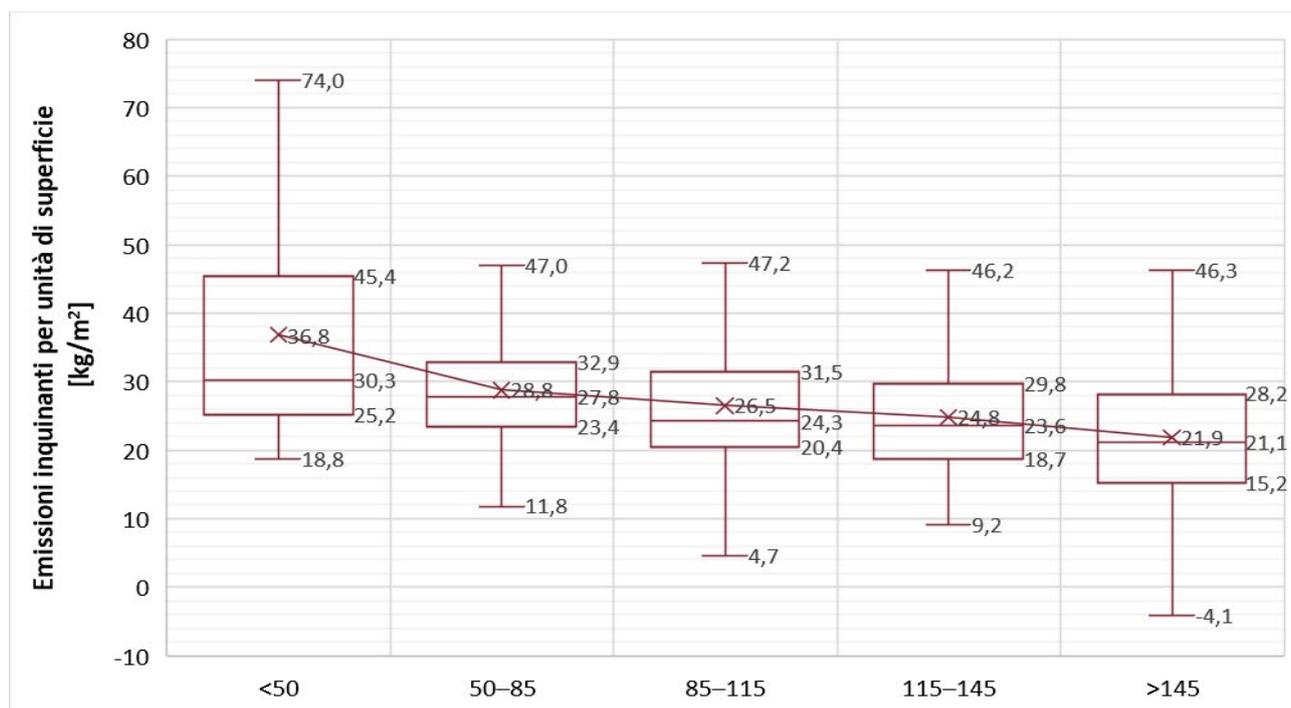


Figura 5.10 – Emissioni inquinanti per unità di superficie.

Tabella 5.13 – Emissioni inquinanti per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kg/m ²]	Scenario #R1 [kg/m ²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	40,5	36,8	-9,1%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	30,6	28,8	-5,9%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	28,5	26,5	-7,0%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	26,6	24,8	-6,8%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	23,4	21,6	-7,7%
Tutte le abitazioni	27,0	25,2	-6,6%

5.3.3 Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)

Per lo Scenario #R2, è stata anche effettuata una valutazione della quota di energia rinnovabile utilizzata nelle abitazioni, come rapporto tra i consumi di energia primaria coperti mediante FER e i consumi di energia primaria complessivi.

Per questo scenario, la quota di energia rinnovabile risulta mediamente pari al 12,6%, con una crescita del 4,6% rispetto allo scenario #R0, dovuta all'utilizzo della rinnovabile aerotermica e al maggior utilizzo (autoconsumo) dell'energia elettrica generata dagli impianti fotovoltaici, ove presenti; il primo quartile delle abitazioni impiega FER per una quota inferiore al 9,2% dei propri consumi; il secondo quartile per una quota inferiore al 12,0%; il terzo quartile per una quota inferiore al 15,0%.

Come riportato in Figura 5.11 e in Tabella 5.14 la quota di FER impiegata è più alta per le piccole (17,1%) e decresce al crescere delle dimensioni delle abitazioni (14,0% per le medio-piccole, 13,2% per le medie, 12,5% per le medio-grandi, 11,3% per le grandi); tale circostanza discende dal fatto che l'utilizzo di una pompa di calore come generatore di calore consente di sostituire l'utilizzo del generatore di calore a gas in misura maggiore nelle abitazioni più piccole.

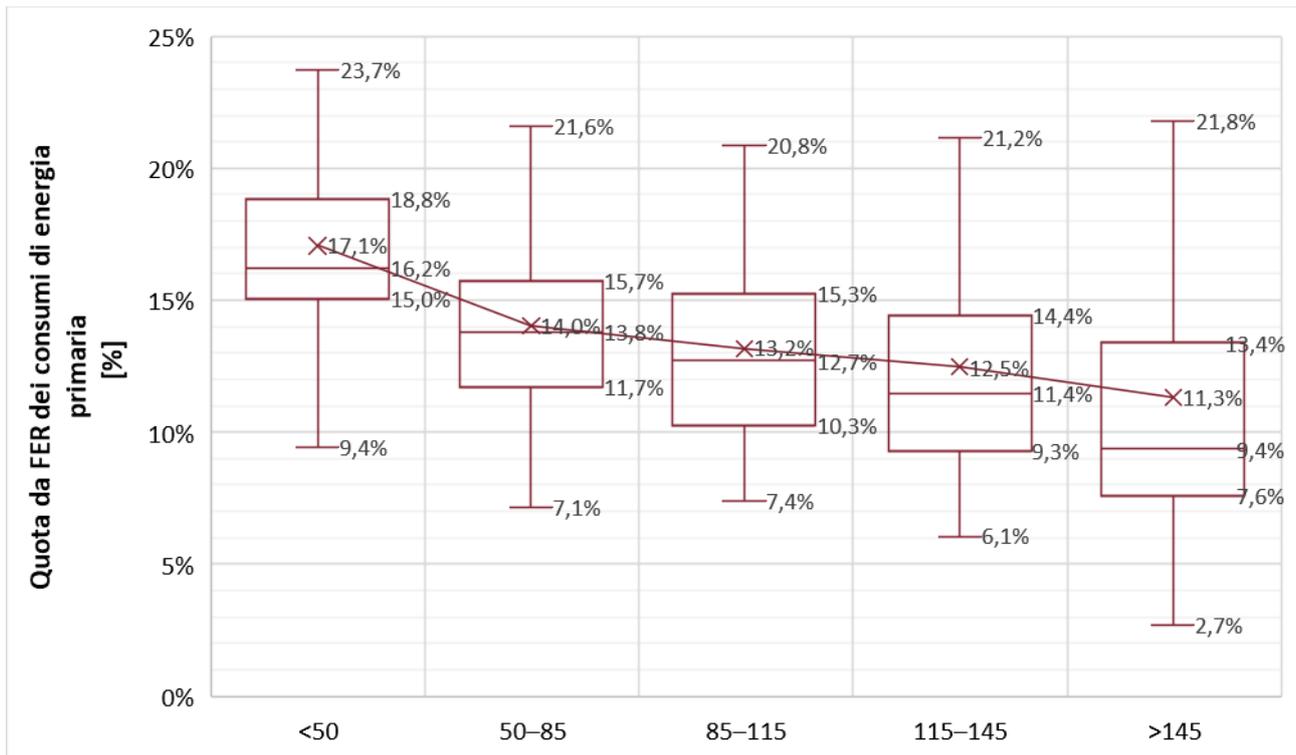


Figura 5.11 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione delle classi dimensionali individuate.

Tabella 5.14 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione delle classi dimensionali individuate.

	Scenario #R0 [%]	Scenario #R2 [%]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	11,3%	17,1%	5,8%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	10,0%	14,0%	4,0%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	8,5%	13,2%	4,7%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	7,8%	12,5%	4,7%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	6,4%	11,3%	4,9%
Tutte le abitazioni	8,0%	12,6%	4,6%

Per lo Scenario #R2 l'energia complessivamente esportata rimane pari all'1,1% dei consumi complessivi di energia primaria delle abitazioni.

5.3.4 Carichi flessibili dell'abitazione

Per lo scenario #R2 è stata quindi effettuata una valutazione parametrica dei carichi elettrici flessibili (accumulabili + differibili), considerando i carichi flessibili per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

L'introduzione di un ulteriore climatizzatore e la diversa modalità di utilizzo dei climatizzatori comporta un trasferimento di parte dei carichi di riscaldamento dal vettore gas al vettore energia elettrica. Inoltre, l'aggiunta di un climatizzatore comporta l'incremento dei consumi elettrici per il raffrescamento.

Si ha pertanto un incremento generalizzato dei consumi di energia elettrica, concentrato nei mesi invernali per quanto riguarda il riscaldamento e nei mesi estivi per quanto riguarda il raffrescamento; conseguentemente si ha un incremento dei carichi flessibili delle abitazioni, essendo sia il riscaldamento sia

il raffrescamento considerati carichi accumulabili. La Tabella 5.15 riporta un confronto tra i consumi elettrici dell'abitazione media tra lo Scenario #R0 e lo Scenario #R2.

Tabella 5.15 – Carichi elettrici mensili per l'abitazione media.

	Scenario #R0 [kWh]	Scenario #R2 [kWh]	Differenza [%]
Gennaio	261	368	41,2%
Febbraio	233	324	38,9%
Marzo	251	315	25,7%
Aprile	228	240	4,9%
Maggio	228	228	0,2%
Giugno	228	233	2,3%
Luglio	261	285	8,9%
Agosto	260	282	8,6%
Settembre	223	224	0,8%
Ottobre	228	229	0,7%
Novembre	242	298	23,0%
Dicembre	259	358	38,1%
Totale	2902	3385	16,6%

Per questo scenario, i carichi flessibili per unità di superficie sono mediamente pari a 13,1 kWh/m², con un incremento medio del 38,9%; il primo quartile ha carichi flessibili per unità di superficie inferiori a 7,6 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 10,7 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 16,3 kWh/m².

In Tabella 5.16 e in Figura 5.12, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i consumi di energia primaria per riscaldamento per unità di superficie.

Tabella 5.16 – Carichi flessibili per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m²]	Scenario #R2 [kWh/m²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	17,3	24,5	41,6%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	13,5	17,6	30,4%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	10,4	14,2	36,5%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	9,2	12,8	39,1%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	6,1	9,1	49,2%
Tutte le abitazioni	9,4	13,1	38,9%

I maggiori incrementi dei carichi flessibili si hanno per le abitazioni più grandi, per le quali si osserva un incremento dei carichi flessibili del 49,2%. Ciò è una conseguenza del fatto che le abitazioni più grandi hanno, con riferimento all'unità di superficie, una minore flessibilità iniziale; inoltre, per le abitazioni più grandi, è maggiore la probabilità di avere a disposizione un numero alto di climatizzatori.

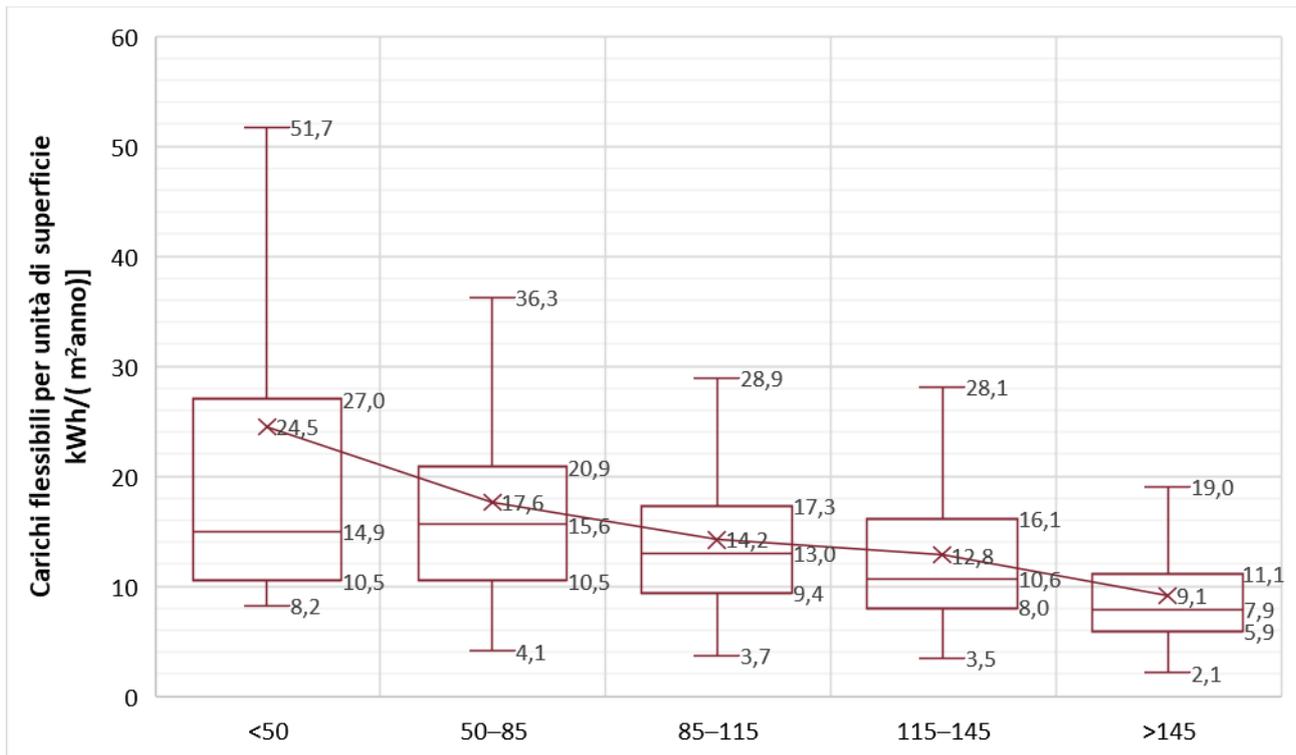


Figura 5.12 – Carichi flessibili per unità di superficie.

5.4 Aggregazione virtuale delle utenze e curve di carico per gli scenari #R0, #R1, #R2

5.4.1 Curve di carico aggregate per lo scenario #R0

A partire dai profili di consumo degli archetipi, utilizzando la procedura di “Best Fitting” descritta in precedenza (cfr. paragrafo 4.1.1) è stato ricostruito l’aggregato dei consumi di tutte le 1545 abitazioni del database. La Tabella 5.17 riporta nuovamente i dati di riferimento degli archetipi, per comodità di lettura.

Tabella 5.17 – Parametri di riferimento degli archetipi.

Parametri	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
Carichi accumulabili [kWh]	191	106	111	165	950	213	112	49	181	110	46	92	122	81
Carichi differibili [kWh]	667	188	549	190	808	714	549	139	915	618	820	1.274	835	556
Carichi non differibili [kWh]	2.648	1.024	1.085	879	1.298	1.000	1.099	881	2.384	1.218	1.049	1.754	1.439	959
Preparaz. ACS a gas=0; elettrico =1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Presenza/assenza Imp. Fotovolt.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Superficie abitazione [m ²]	49	101	66	50	100	50	66	60	94	102	67	134	137	110
Numero occupanti [-]	4	2	3	1	4	4	2	2	3	2	3	4	3	2
Presenza/assenza in orario 8-13	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1
Presenza/assenza in orario 13-19	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Presenza/assenza in orario 19-0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Presenza/assenza in orario 0-8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

La Figura 5.13 mostra i risultati relativi alla procedura selettiva, riportando il miglior fitting per ogni archetipo. Mediamente, per l'intero database, si ha un valore di "Best Fitting" pari a 0,806. Per il primo quartile, si ha un valore di BF= 0,77, per il secondo quartile si ha un valore di BF= 0,81; per il terzo si ha un valore di BF=0,85.

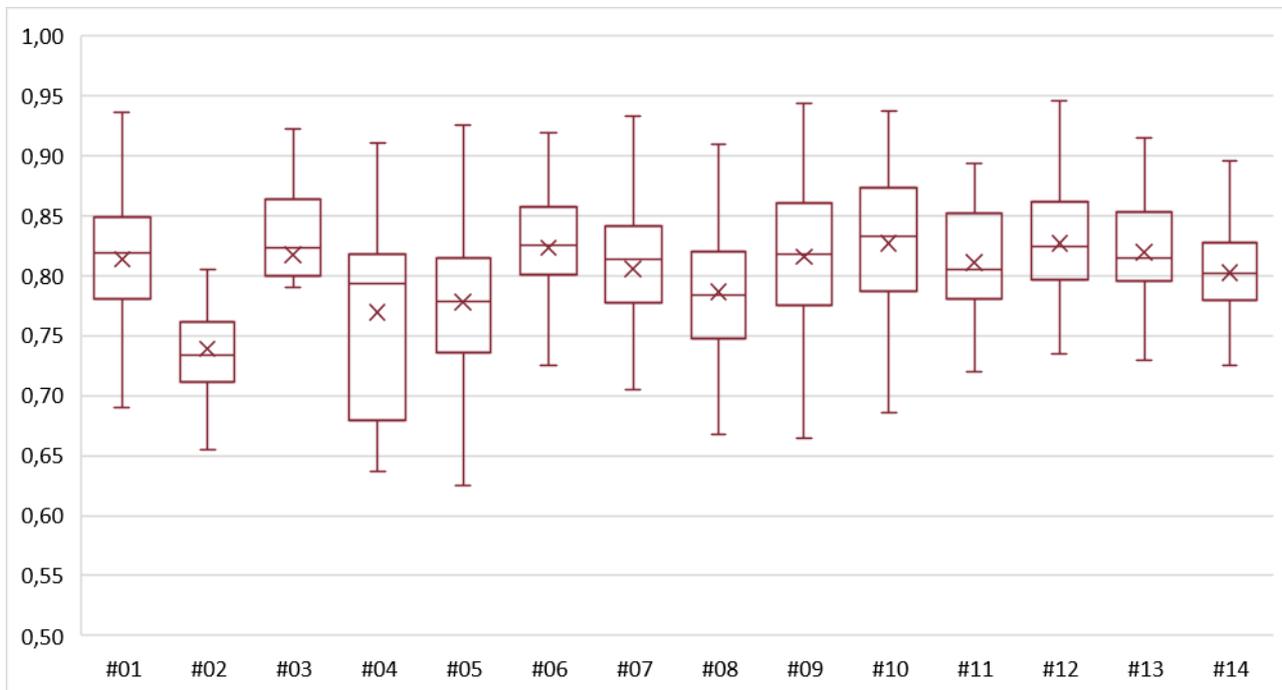


Figura 5.13 – Risultati della procedura di Best Fitting per l'intero database.

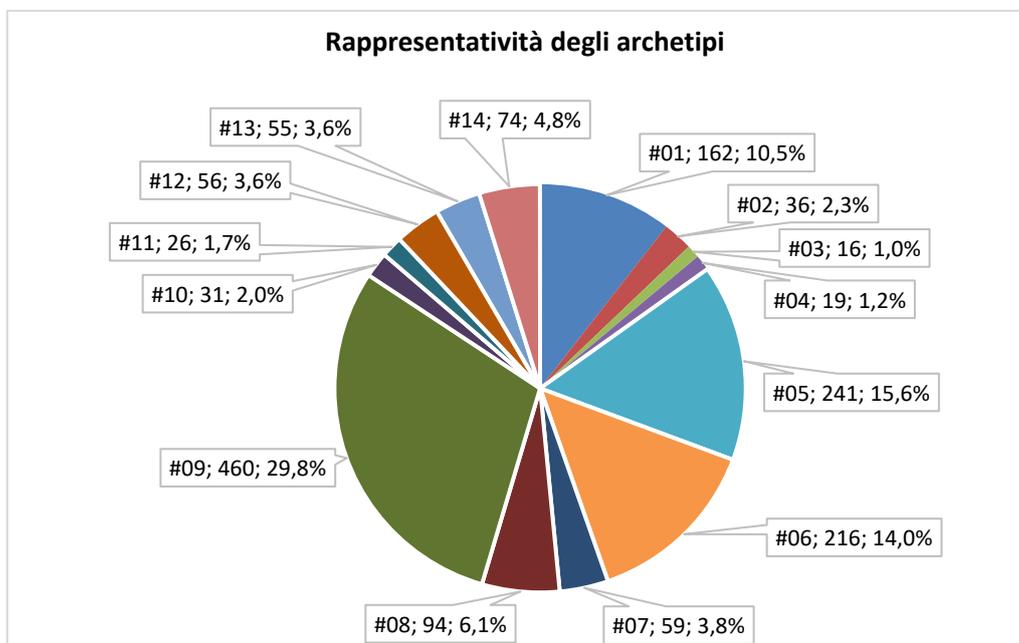


Figura 5.14 – Rappresentatività degli archetipi.

In termini di rappresentatività, l'archetipo maggiormente rappresentativo è il #9 (29,7% del database), seguito dal #05 (15,5% del campione) e dal #06 (13,9% del campione), così come illustrato in Figura 5.14.

La Tabella 5.18 riassume la rappresentatività degli archetipi in termini assoluti e percentuali, relativamente al numero di abitazioni, alla superficie cumulativa in pianta, al numero di occupanti, ai consumi elettrici, ai carichi accumulabili e differibili.

Tabella 5.18 – Rappresentatività degli archetipi.

Archetipo	Numero abitazioni	Superficie [m ²]	Occupanti	Consumi elettrici [kWh/y]	Carichi accumulabili [kWh/y]	Carichi differibili [kWh/y]
#01	162 (10,4%)	21670 (10,9%)	621 (12,4%)	517715 (11,3%)	38669 (5,4%)	83624 (8%)
#02	36 (2,3%)	2567 (1,2%)	63 (1,2%)	72164 (1,5%)	12235 (1,7%)	7331 (0,7%)
#03	16 (1%)	1265 (0,6%)	51 (1%)	38652 (0,8%)	5795 (0,8%)	7895 (0,7%)
#04	19 (1,2%)	1302 (0,6%)	23 (0,4%)	35290 (0,7%)	7225 (1%)	3166 (0,3%)
#05	241 (15,5%)	31859 (16%)	787 (15,7%)	1005953 (22%)	426844 (59,9%)	140339 (13,4%)
#06	216 (13,9%)	33936 (17,1%)	676 (13,5%)	464129 (10,1%)	46693 (6,5%)	139446 (13,3%)
#07	59 (3,8%)	4666 (2,3%)	118 (2,3%)	143999 (3,1%)	10007 (1,4%)	38578 (3,6%)
#08	94 (6%)	6165 (3,1%)	197 (3,9%)	174631 (3,8%)	14141 (1,9%)	21940 (2%)
#09	460 (29,7%)	64699 (32,6%)	1707 (34,1%)	1491425 (32,6%)	105050 (14,7%)	421399 (40,3%)
#10	31 (2%)	3175 (1,6%)	73 (1,4%)	74627 (1,6%)	10784 (1,5%)	17017 (1,6%)
#11	26 (1,6%)	2104 (1%)	75 (1,5%)	60083 (1,3%)	1082 (0,1%)	18790 (1,7%)
#12	56 (3,6%)	7444 (3,7%)	220 (4,4%)	177547 (3,8%)	8070 (1,1%)	64944 (6,2%)
#13	55 (3,5%)	7696 (3,8%)	194 (3,8%)	153513 (3,3%)	17086 (2,4%)	41531 (3,9%)
#14	74 (4,7%)	9450 (4,7%)	189 (3,7%)	151491 (3,3%)	7757 (1%)	38943 (3,7%)
Aggregato	1545 (100%)	198004 (100%)	4994 (100%)	4561219 (100%)	711438 (100%)	1044943 (100%)

Considerando il numero di occorrenze degli archetipi, i profili di carico aggregati sono stati costruiti per i giorni feriali medi, pre-festivi e festivi, per ogni mese dell'anno.

Questi profili di carico sono mostrati nelle Figure e nelle Tabelle seguenti. Nelle tabelle i valori numerici sono sovrapposti a un codice di colorazione intuitivo, che indica anche l'entità dei consumi in modo grafico; i valori numerici riportati si riferiscono all'assorbimento medio orario, misurato in Watt, calcolato dividendo i valori aggregati per il numero totale delle abitazioni (cioè 1545).

Per quanto riguarda i giorni feriali (Tabella 5.19; Figura 5.15), si può notare come il profilo aggregato abbia un leggero picco mattutino intorno alle 8:00 a.m. e un picco distribuito più alto la sera, a partire dalle 20:00 p.m. fino alle 23:00 p.m.

La Tabella 5.20 e la Figura 5.16 riportano il profilo di carico medio per i giorni pre-festivi. In questo caso, si osservano maggiori fluttuazioni nell'assorbimento orario medio, a partire dalle ultime ore del mattino fino alla fine della giornata. Ciò è dovuto alla variabilità dei comportamenti degli occupanti in relazione a ciascun archetipo; i picchi pomeridiani e serali si verificano in orari diversi, variando anche di mese in mese.

Infine, in Tabella 5.21 e in Figura 5.17 è riportato il profilo di carico per i giorni festivi; si osserva un maggior prelievo nelle ore pomeridiane e una più ampia zona di picco nelle ore serali.

Tabella 5.19 – Profilo di consumo aggregato – Giorni feriali.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	187	130	121	108	105	121	171	255	265	213	199	198	196	230	215	218	195	214	253	350	435	384	378	265
Febbraio	240	191	155	162	163	167	343	349	302	243	281	268	246	240	243	324	286	300	326	406	474	496	495	372
Marzo	210	165	141	134	162	139	296	339	247	230	225	210	184	206	231	230	236	213	272	379	483	460	459	326
Aprile	250	193	151	144	152	147	225	270	284	248	238	223	225	241	266	278	267	288	273	379	522	486	459	316
Maggio	202	152	138	124	135	136	227	267	250	229	197	204	221	233	238	245	233	228	241	307	372	406	406	304
Giugno	243	188	150	131	142	141	166	234	218	223	212	228	237	264	324	323	307	271	297	318	412	423	407	347
Luglio	260	210	188	170	165	168	170	213	216	199	187	186	231	272	308	348	338	335	332	348	347	361	358	301
Agosto	295	264	217	209	203	202	205	208	237	234	242	250	289	343	381	401	402	377	357	356	383	384	363	323
Settembre	229	167	156	139	135	135	178	254	215	237	221	231	223	230	282	295	275	239	249	340	423	442	432	347
Ottobre	209	172	162	144	152	149	219	329	287	282	247	249	248	227	239	278	272	247	255	341	412	383	375	323
Novembre	260	199	169	143	154	152	259	328	300	262	257	285	259	256	259	322	313	319	318	409	476	506	488	393
Dicembre	243	171	152	142	152	136	233	277	277	288	266	248	255	250	270	354	301	345	363	446	499	488	449	364

Tabella 5.20 – Profilo di consumo aggregato – Giorni semifestivi.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	246	165	127	117	117	111	122	146	241	269	322	264	234	352	354	296	270	288	353	418	394	450	325	250
Febbraio	234	187	140	129	123	124	126	180	238	370	392	268	345	454	434	500	522	368	441	380	504	493	456	344
Marzo	239	197	158	132	134	143	143	189	286	378	426	323	349	401	382	440	385	298	332	432	433	481	470	353
Aprile	195	146	116	105	99	98	124	136	204	404	375	274	328	294	327	404	246	214	248	404	515	389	345	359
Maggio	285	259	221	158	125	124	117	178	194	293	274	222	292	364	287	280	281	296	353	304	323	422	350	267
Giugno	229	182	150	131	125	121	161	204	214	285	249	263	318	345	326	331	363	332	370	389	425	430	349	275
Luglio	219	187	185	152	134	146	150	159	185	329	276	216	233	234	335	453	389	383	274	237	208	212	198	231
Agosto	255	229	211	205	172	156	167	177	214	243	260	257	253	314	382	436	352	314	254	266	325	289	300	275
Settembre	271	224	156	139	142	151	138	153	212	279	332	401	322	412	309	292	375	290	311	320	395	421	359	325
Ottobre	290	181	146	142	140	126	116	180	259	252	246	264	259	273	303	257	375	293	273	381	311	316	310	273
Novembre	327	282	295	194	142	134	128	175	260	312	272	266	246	331	419	433	371	443	383	337	402	387	379	290
Dicembre	251	244	189	160	147	141	163	225	279	330	394	289	277	354	464	501	469	441	391	480	536	532	435	360

Tabella 5.21 – Profilo di consumo aggregato – Giorni festivi.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gennaio	197	190	172	140	131	123	113	131	195	279	317	308	370	378	341	293	375	356	338	448	574	517	472	288
Febbraio	272	219	210	132	133	131	128	167	270	275	334	399	347	317	373	455	528	311	344	470	480	478	470	278
Marzo	313	226	183	148	140	143	137	145	240	403	345	249	228	235	312	394	519	238	234	379	419	411	412	303
Aprile	268	176	156	110	102	97	118	131	227	328	311	383	342	282	286	265	276	292	331	502	503	420	374	295
Maggio	186	155	135	114	120	119	125	136	177	236	279	270	303	289	349	299	328	268	239	293	397	399	420	302
Giugno	224	172	163	160	154	153	167	186	208	225	262	271	267	356	367	417	367	305	301	388	439	387	473	371
Luglio	228	207	162	141	141	143	148	158	206	251	205	203	196	285	350	363	369	381	318	219	262	242	250	224
Agosto	217	207	180	148	160	161	166	157	185	199	200	248	258	302	434	453	445	409	356	329	299	342	329	305
Settembre	267	207	168	141	142	148	148	163	218	275	281	265	326	345	396	414	343	325	423	424	477	404	311	260
Ottobre	265	179	151	160	120	119	133	171	241	257	276	259	263	278	327	412	284	284	297	388	397	377	328	222
Novembre	273	202	177	204	216	207	226	238	299	388	411	393	379	422	410	441	438	407	463	518	662	552	499	415
Dicembre	235	188	166	145	148	149	154	171	279	323	372	348	383	319	322	369	443	429	417	474	548	534	469	346

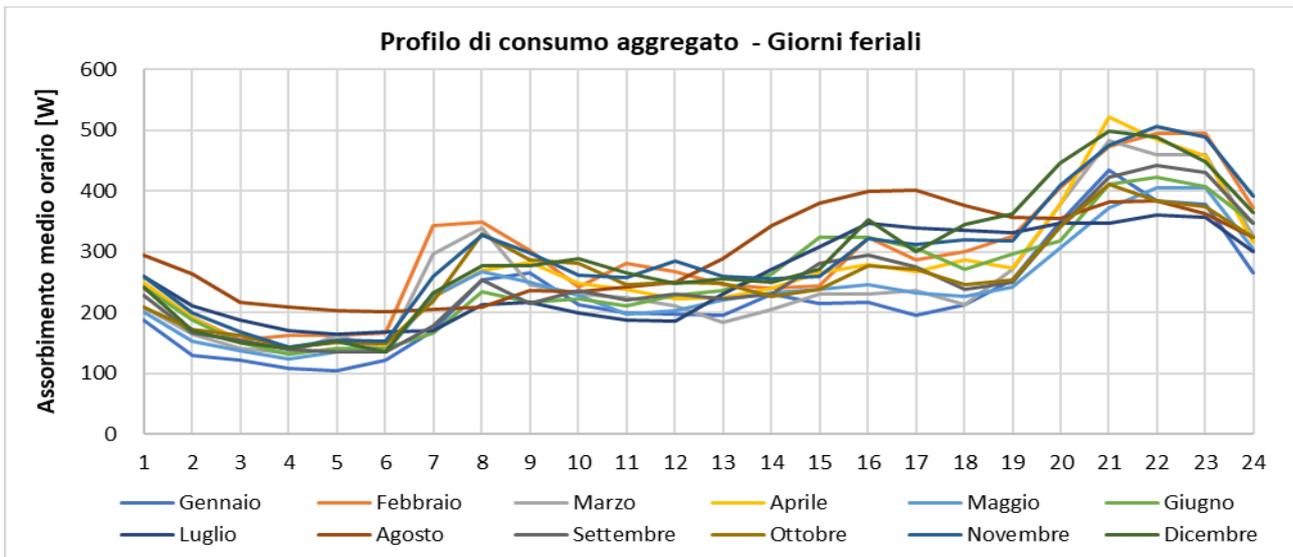


Figura 5.15 – Profilo di consumo aggregato – Giorni feriali.

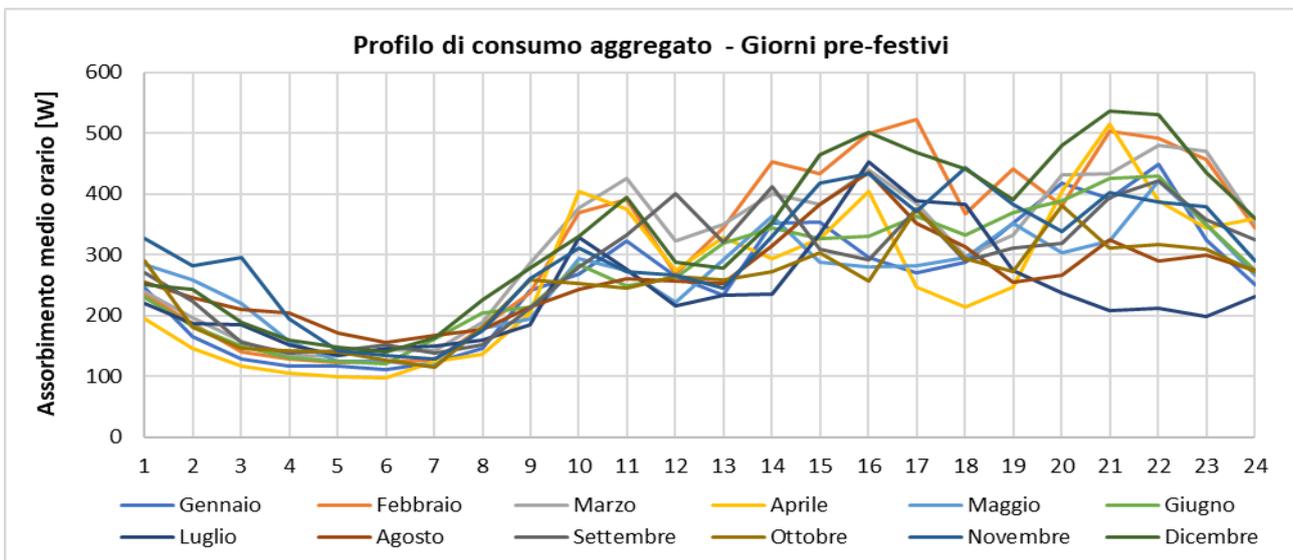


Figura 5.16 – Profilo di consumo aggregato – Giorni pre-festivi.

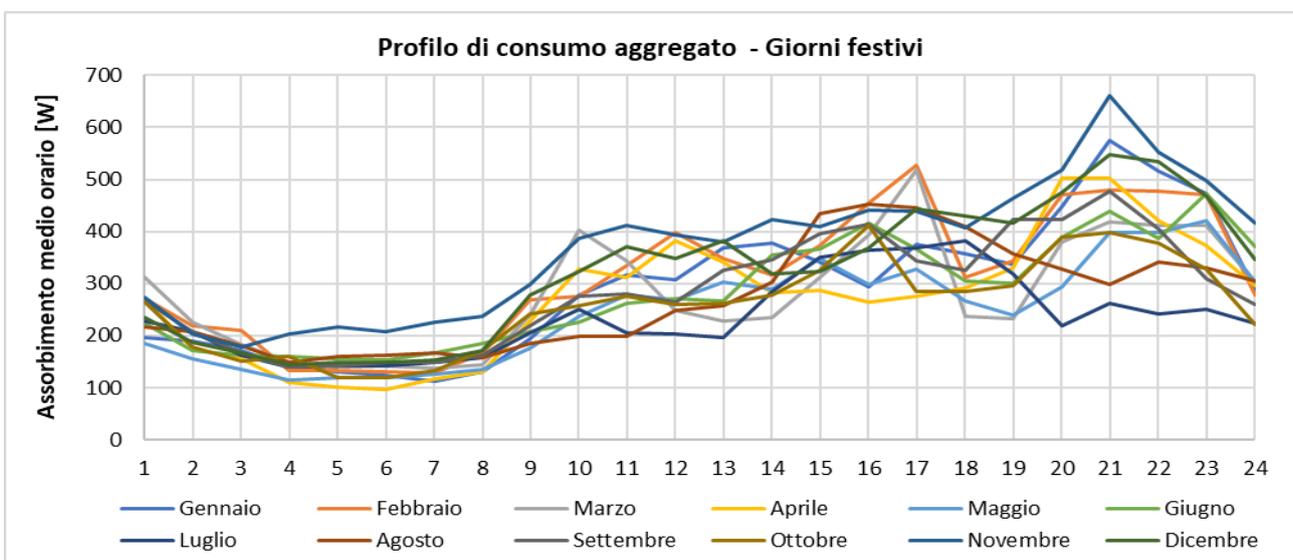


Figura 5.17 – Profilo di consumo aggregato – Giorni festivi.

5.4.2 Variazione delle curve di carico aggregate per gli scenari #R1 e #R2

Per gli scenari #R1 e #R2 si osserva un incremento dei consumi di energia elettrica, limitato ai mesi invernali nel caso dello scenario #R1 (gennaio, febbraio, marzo, novembre, dicembre) esteso anche ai mesi dell’anno per lo scenario #R2 (gennaio, febbraio, marzo, luglio, agosto, novembre, dicembre).

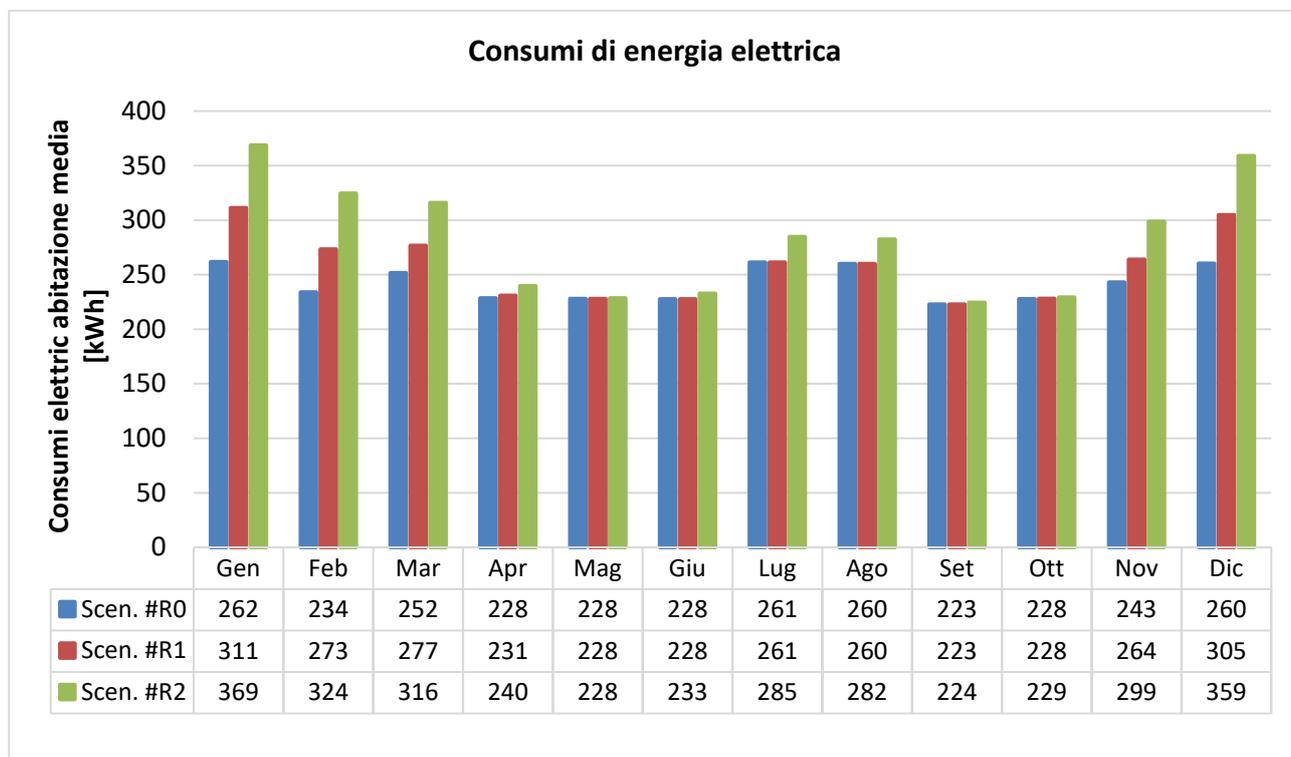


Figura 5.18 – Consumi di energia elettrica mensili per i tre scenari esaminati.

A partire dalle curve di carico aggregate costruite in precedenza, sono state elaborate le nuove curve di carico, considerando le variazioni mensili dei consumi di energia elettrica e ripartendo tali variazioni sulla base di quanto indicato nell’indagine ISTAT sui consumi energetici delle famiglie [10], secondo la quale durante l’inverno l’impianto di riscaldamento viene utilizzato, in media:

- per poco meno di 8 ore al giorno;
- 4 ore e 24 minuti tra le ore 13:00 e le ore 21:00;
- 2 ore e 26 minuti tra le ore 5:00 e le ore 13:00;
- 1 ora tra le ore 21:00 e le 5:00.

Nei grafici seguenti sono riportate le variazioni delle curve di carico per i mesi significativi, ovvero i mesi nei quali la variazione dei consumi elettrici delle abitazioni supera il 20% (gennaio, Figura 5.19; febbraio, Figura 5.20; marzo, Figura 5.21; novembre, Figura 5.22; dicembre, Figura 5.23; luglio, Figura 5.24; agosto, Figura 5.25).

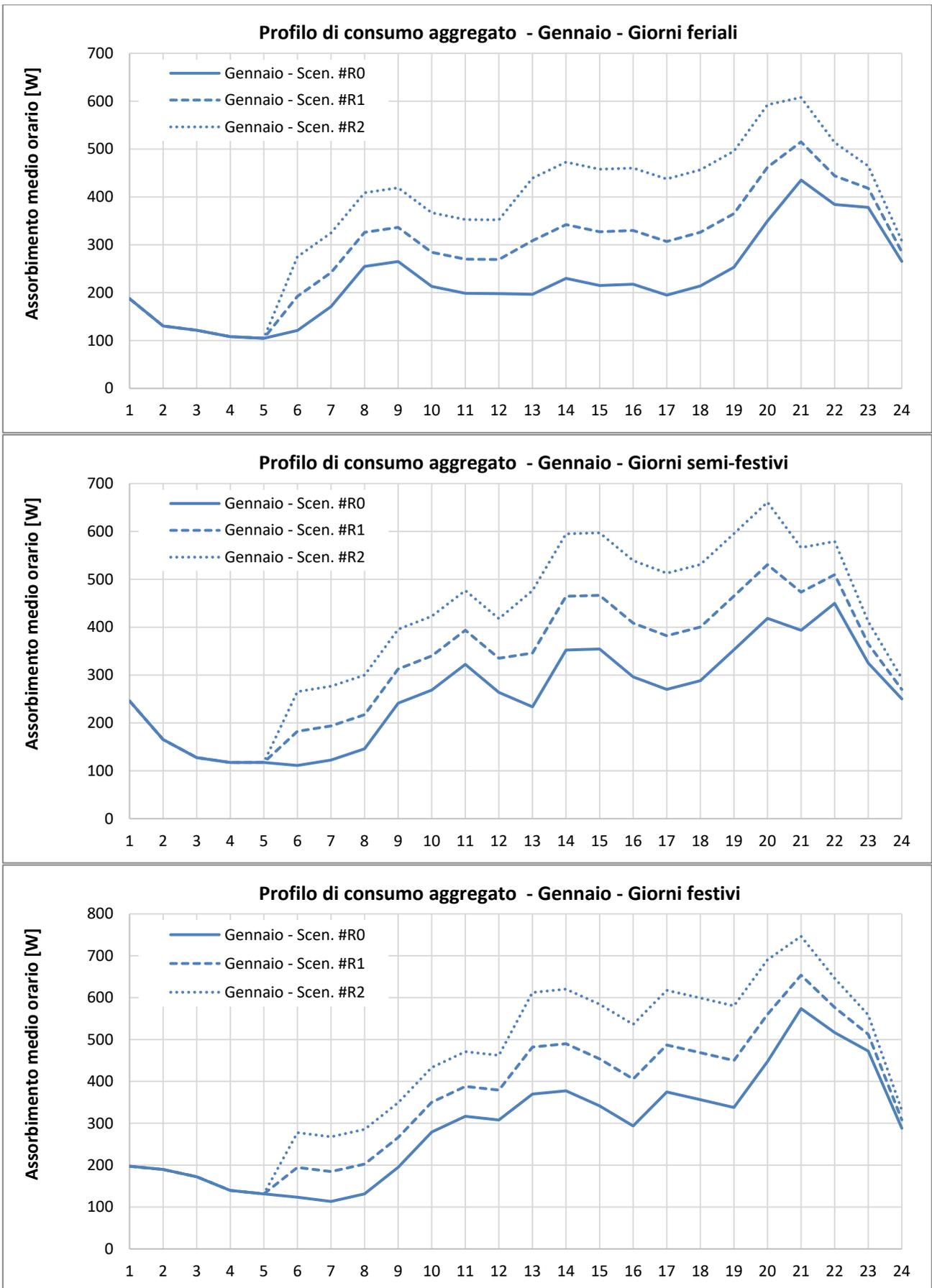


Figura 5.19 – Gennaio - Profili di carico aggregato.

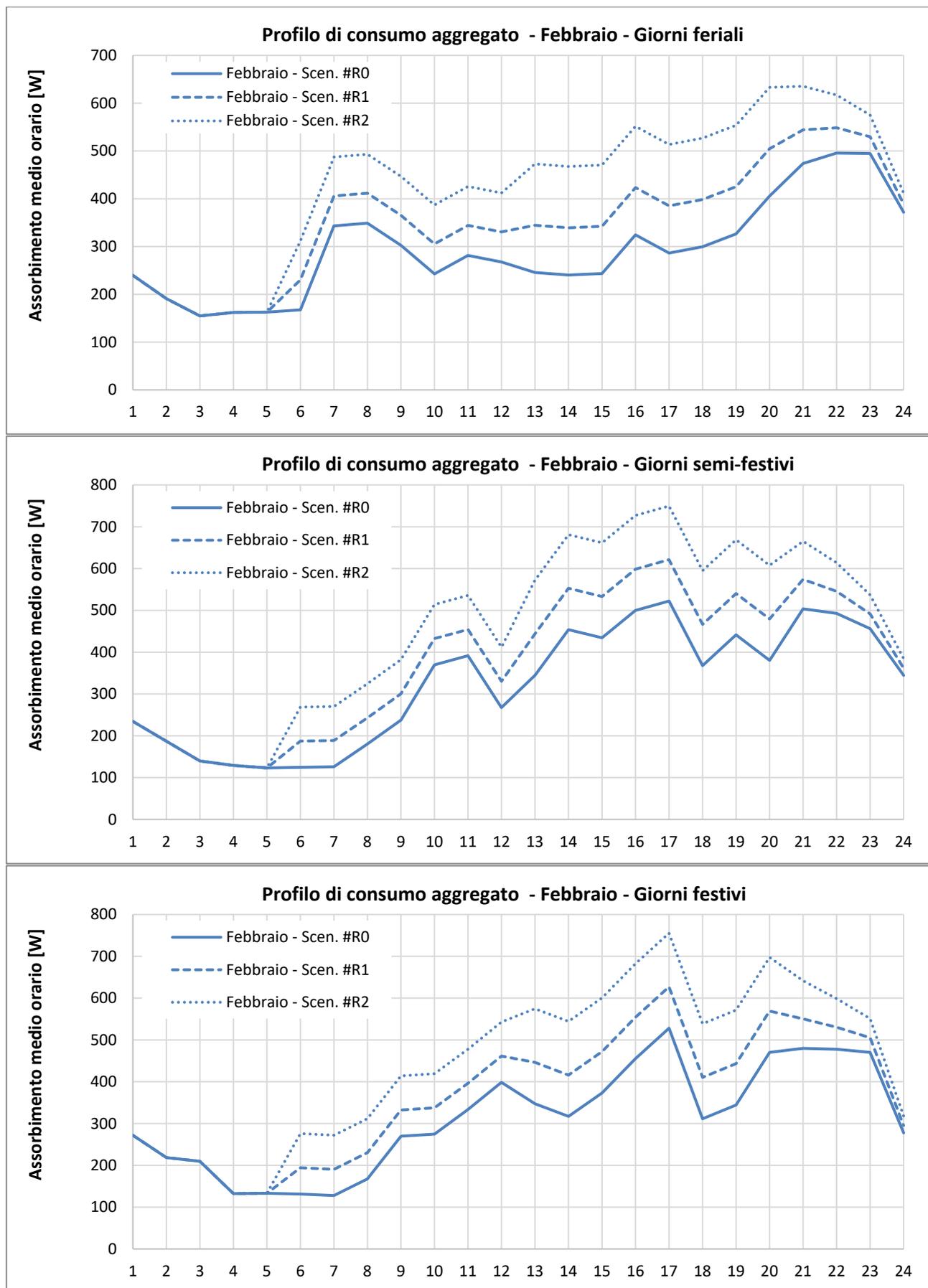


Figura 5.20 – Febbraio - Profili di carico aggregato.

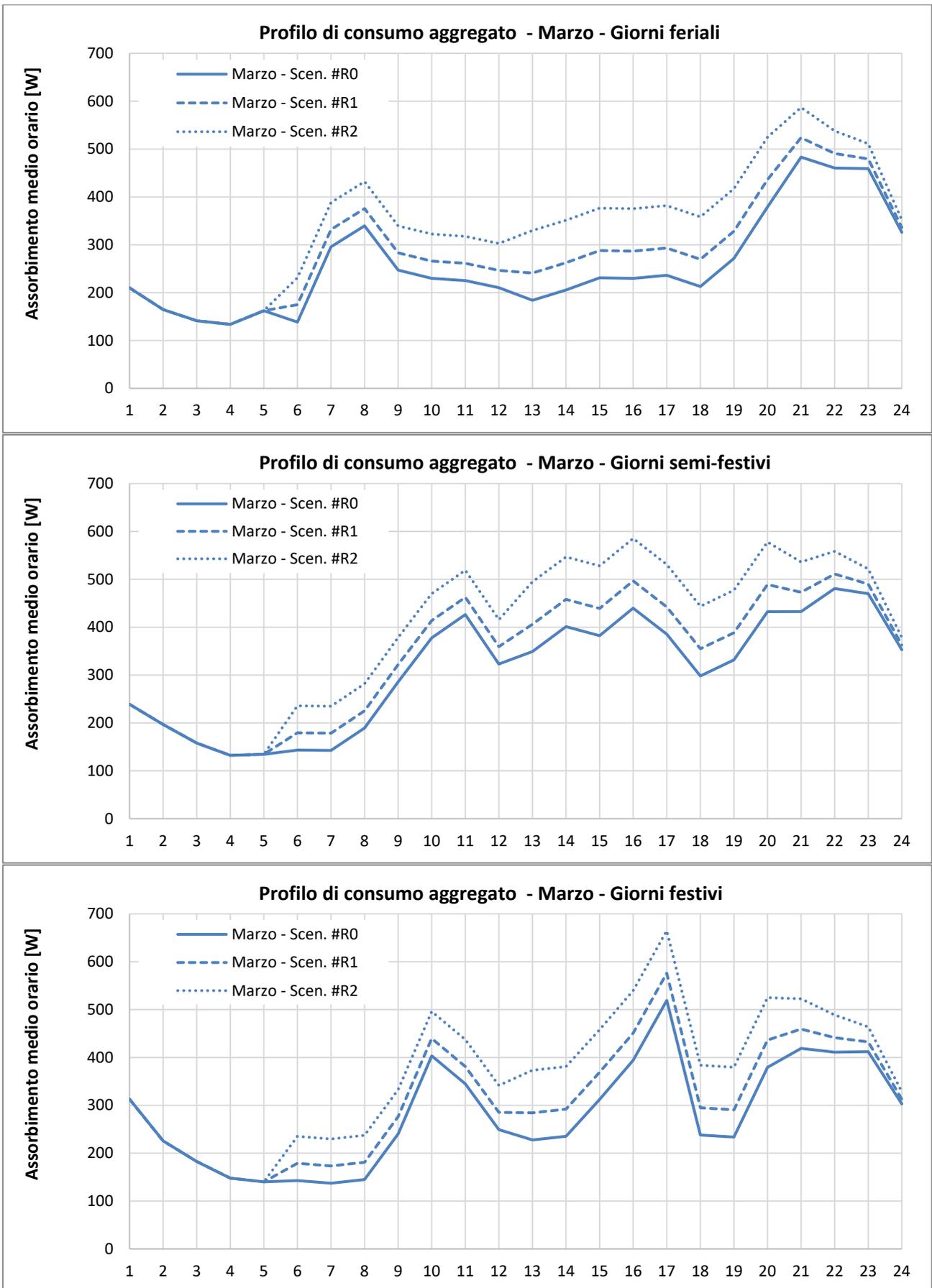


Figura 5.21 – Marzo - Profili di carico aggregato.

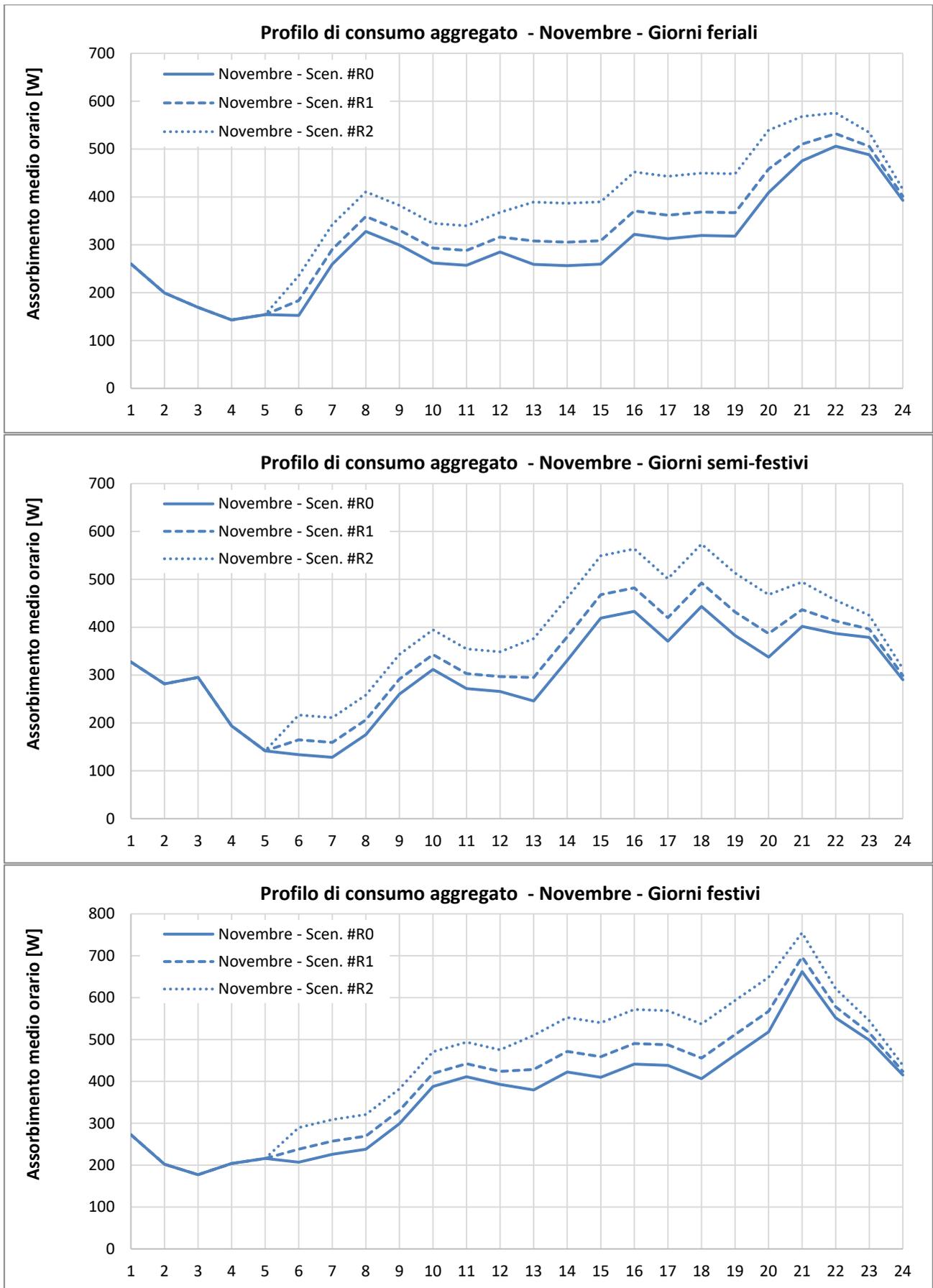


Figura 5.22 – Novembre - Profili di carico aggregato.

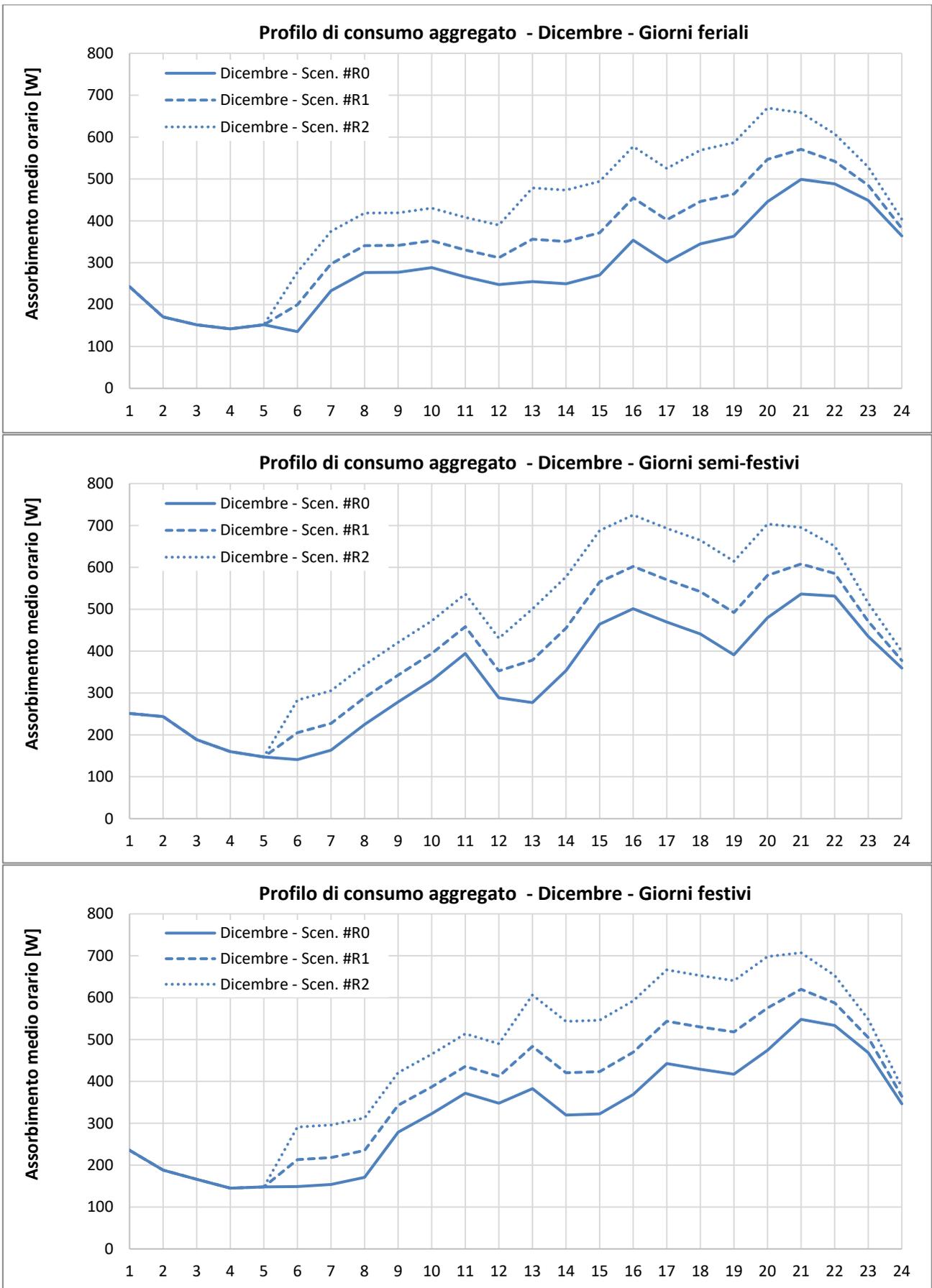


Figura 5.23 – Dicembre - Profili di carico aggregato.

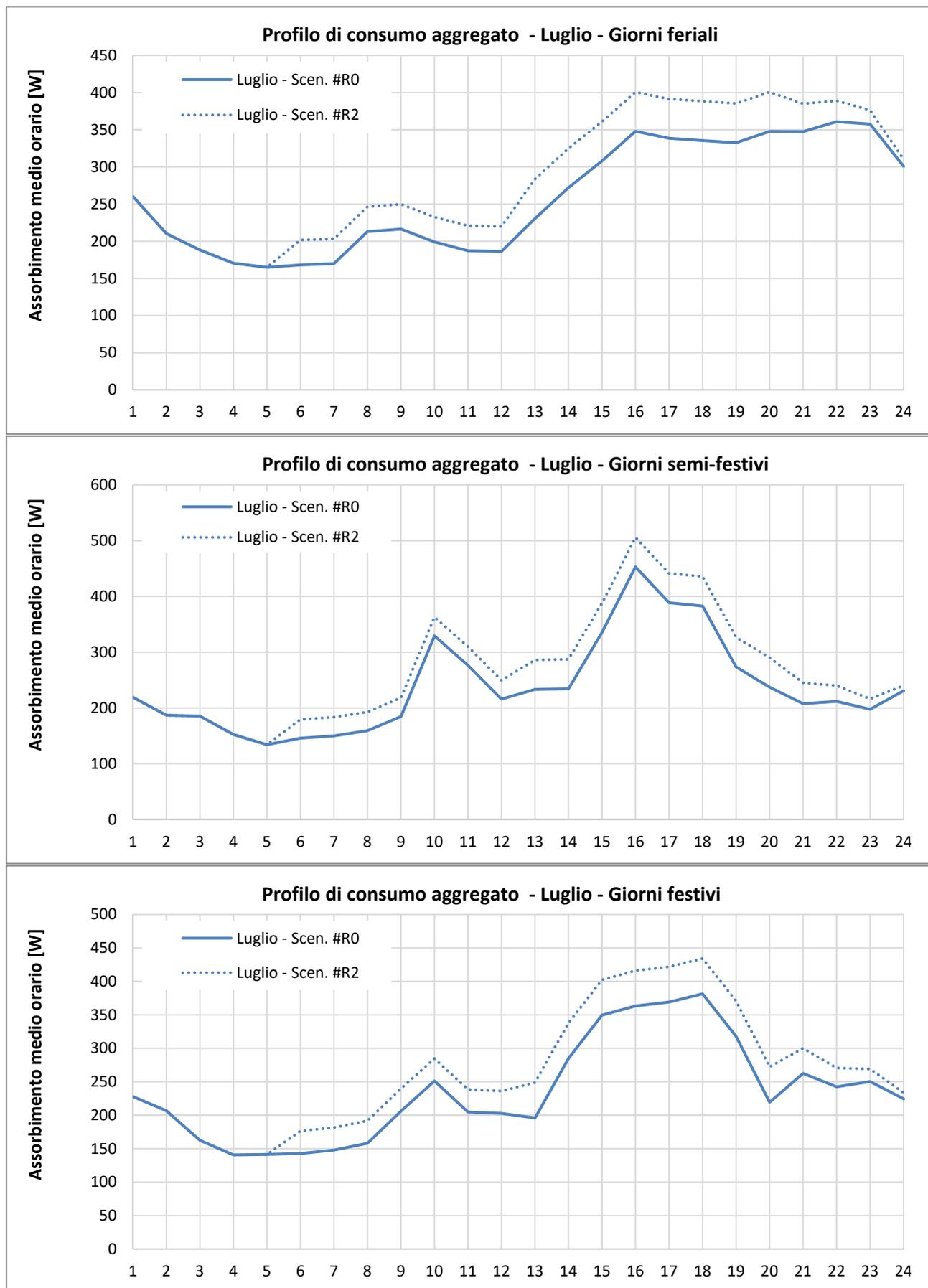


Figura 5.24 – Luglio - Profili di carico aggregato.

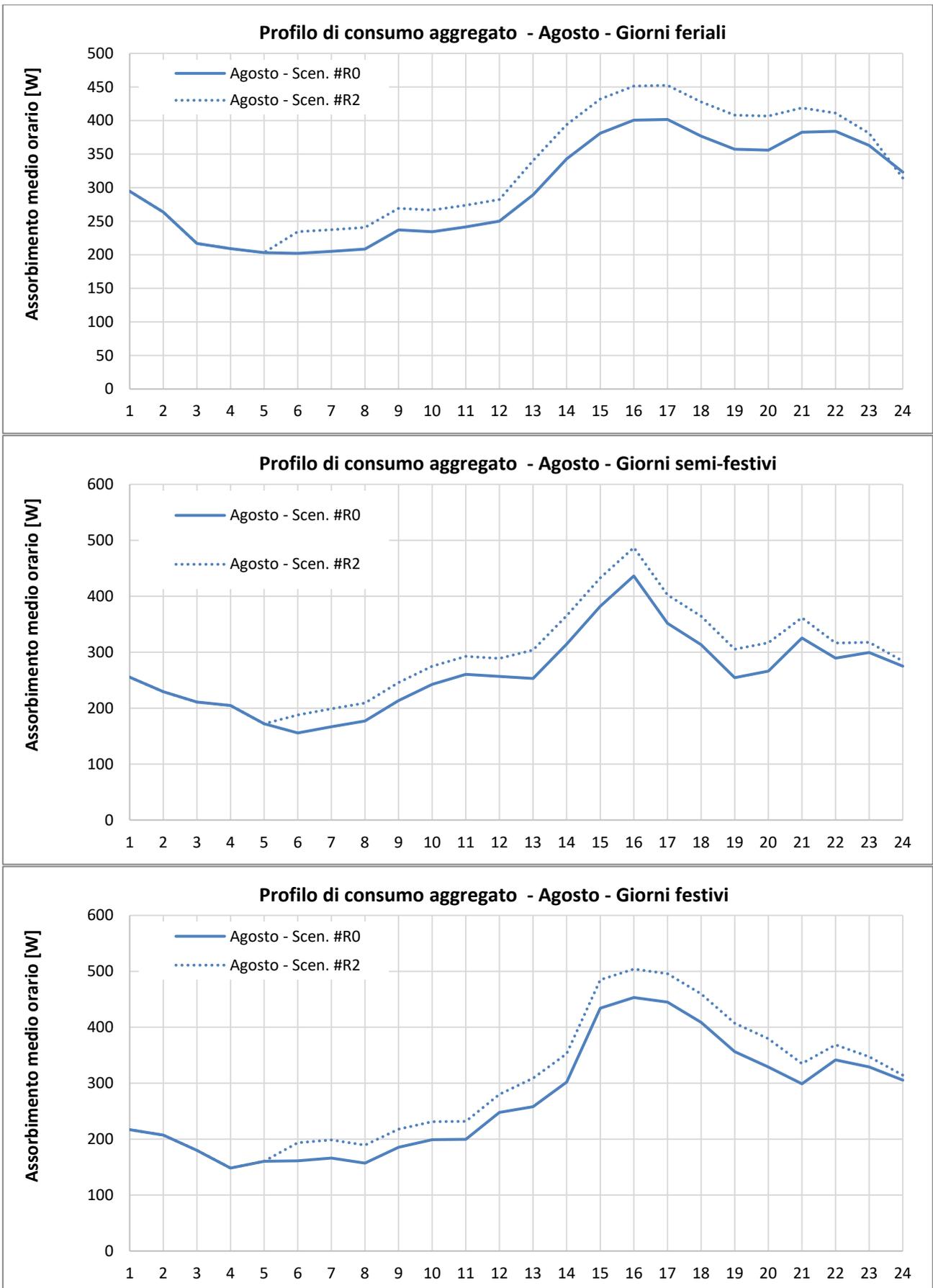


Figura 5.25 – Agosto - Profili di carico aggregato.

L'analisi delle curve di carico evidenzia un incremento generalizzato dei consumi elettrici, con incremento dei picchi di domanda in alcuni casi molto importante.

In Tabella 5.22 sono riportati i picchi di assorbimento massimo per i giorni feriali medi, avendo evidenziato le variazioni superiori al 10%:

- a gennaio il picco cresce del 18,3% nello scenario #R1 e del 39,7% nello scenario #R2;
- a febbraio il picco cresce del 10,6% nello scenario #R1 e del 28,2% nello scenario #R2;
- a marzo il picco cresce dell'8,4% nello scenario #R1 e del 21,4% nello scenario #R2;
- a novembre il picco cresce del 5,2% nello scenario #R1 e del 13,7% nello scenario #R2;
- a dicembre il picco cresce del 14,4% nello scenario #R1 e del 34,2% nello scenario #R2;
- a luglio il picco cresce del 27,7% nello scenario#R2;
- ad agosto il picco cresce del 27,0% nello scenario#R2;
- mediamente la crescita del picco è del 5,1% nello scenario #R1 e del 16,5% nello scenario #R2.

Tabella 5.22 – Giorni feriali – Picco di assorbimento massimo.

	Scenario #R0 [W]	Scenario #R1 [W]	Differenza #R1 - #R0 [%]	Scenario #R2 [W]	Differenza #R1 - #R0 [%]
Gennaio	435	515	18,3%	608	39,7%
Febbraio	496	549	10,6%	635	28,2%
Marzo	483	524	8,4%	587	21,4%
Aprile	522	526	0,8%	541	3,6%
Maggio	406	406	0,0%	407	0,1%
Giugno	423	423	0,0%	425	0,5%
Luglio	361	361	0,0%	461	27,7%
Agosto	402	402	0,0%	510	27,0%
Settembre	442	442	0,0%	444	0,5%
Ottobre	412	412	0,1%	414	0,6%
Novembre	506	532	5,2%	576	13,7%
Dicembre	499	571	14,4%	670	34,2%
Media	449	472	5,1%	523	16,5%

In Tabella 5.23 sono riportati i picchi di assorbimento massimo per i giorni semi-festivi medi, avendo evidenziato le variazioni superiori al 10%:

- a gennaio il picco cresce del 18,0% nello scenario #R1 e del 47,0% nello scenario #R2;
- a febbraio il picco cresce del 18,9% nello scenario #R1 e del 43,5% nello scenario #R2;
- a marzo il picco cresce dell'6,3% nello scenario #R1 e del 21,8% nello scenario #R2;
- a novembre il picco cresce dell'11,4% nello scenario #R1 e del 29,4% nello scenario #R2;
- a dicembre il picco cresce del 13,4% nello scenario #R1 e del 35,2% nello scenario #R2;
- a luglio il picco cresce del 24,9% nello scenario#R2;
- ad agosto il picco cresce del 24,9% nello scenario#R2;
- mediamente la crescita del picco è del 6,1% nello scenario #R1 e del 20,2% nello scenario #R2.

Tabella 5.23 – Giorni semi-festivi – Picco di assorbimento massimo.

	Scenario #R0 [W]	Scenario #R1 [W]	Differenza #R1 - #R0 [%]	Scenario #R2 [W]	Differenza #R1 - #R0 [%]
Gennaio	450	531	18,0%	661	47,0%
Febbraio	522	621	18,9%	750	43,5%
Marzo	481	511	6,3%	585	21,8%
Aprile	515	519	0,8%	534	3,6%
Maggio	422	422	0,0%	423	0,2%
Giugno	430	430	0,0%	432	0,5%
Luglio	453	453	0,0%	566	24,9%
Agosto	436	436	0,0%	545	24,9%
Settembre	421	421	0,0%	423	0,5%
Ottobre	381	382	0,2%	384	0,9%
Novembre	443	492	11,1%	574	29,4%
Dicembre	536	608	13,4%	725	35,2%
Media	458	486	6,1%	550	20,2%

In Tabella 5.24 sono riportati i picchi di assorbimento massimo per i giorni festivi medi, avendo evidenziato le variazioni superiori al 10%:

- a gennaio il picco cresce del 13,9% nello scenario #R1 e del 30,1% nello scenario #R2;
- a febbraio il picco cresce del 18,7% nello scenario #R1 e del 43,0% nello scenario #R2;
- a marzo il picco cresce dell'11,0% nello scenario #R1 e del 28,1% nello scenario #R2;
- a novembre il picco cresce del 5,3% nello scenario #R1 e del 14,0% nello scenario #R2;
- a dicembre il picco cresce del 13,1% nello scenario #R1 e del 29,0% nello scenario #R2;
- nello scenario#R2, a luglio il picco cresce del 29,6%, mentre ad agosto cresce del 23,9%;
- mediamente la crescita del picco è del 5,8% nello scenario #R1 e del 17,7% nello scenario #R2.

Tabella 5.24 – Giorni festivi – Picco di assorbimento massimo.

	Scenario #R0 [W]	Scenario #R1 [W]	Differenza #R1 - #R0 [%]	Scenario #R2 [W]	Differenza #R1 - #R0 [%]
Gennaio	574	654	13,9%	747	30,1%
Febbraio	528	627	18,7%	755	43,0%
Marzo	519	576	11,0%	665	28,1%
Aprile	503	507	0,9%	528	5,0%
Maggio	420	420	0,0%	421	0,1%
Giugno	473	473	0,0%	475	0,5%
Luglio	381	381	0,0%	494	29,6%
Agosto	453	453	0,0%	562	23,9%
Settembre	477	477	0,0%	480	0,6%
Ottobre	412	413	0,2%	416	0,8%
Novembre	662	697	5,3%	755	14,0%
Dicembre	548	620	13,1%	707	29,0%
Media	496	525	5,8%	584	17,7%

5.5 Considerazioni di riepilogo e conclusive

In questo paragrafo sono mostrati i risultati delle simulazioni effettuate volte a considerare un'abitudine che si va sempre più diffondendo nel contesto residenziale italiano che è quella di utilizzare i climatizzatori presenti nelle abitazioni (se del tipo a pompa di calore) come generatore prioritario per il riscaldamento, in affiancamento all'impianto principale di riscaldamento (nella maggior parte dei casi dotato di caldaia a combustione come generatore di calore).

A partire dal database delle 1545 abitazioni, sono state effettuate delle simulazioni volte a valutare gli effetti sui consumi energetici di:

1. utilizzo dei climatizzatori presenti come generatore prioritario di riscaldamento (Scenario #R1);
2. introduzione di un ulteriore climatizzatore in tutte le abitazioni e utilizzo dei climatizzatori come generatore prioritario di riscaldamento (Scenario #R2); questo secondo scenario può essere considerato come uno scenario evolutivo ulteriore che tiene conto di una tendenza piuttosto diffusa nel settore residenziale (sebbene finalizzata al comfort estivo) rappresentata dall'installazione di nuovi climatizzatori a pompa di calore.

I risultati delle elaborazioni effettuate possono così essere sintetizzati:

1. l'utilizzo dei climatizzatori presenti come generatore prioritario comporta una diminuzione dei consumi di energia primaria per riscaldamento che si riflette sui consumi di energia primaria complessivi dell'abitazione in ragione dell'importanza di questi ultimi; tale tendenza è amplificata nello scenario che prevede l'introduzione di un ulteriore climatizzatore (Scenario #R2);
2. la diversa modalità di utilizzo dei climatizzatori comporta un trasferimento di parte dei carichi di riscaldamento dal vettore gas al vettore energia elettrica; si ha pertanto un incremento dei consumi di energia elettrica, concentrato nei mesi invernali (per lo Scenario #R1) ed esteso anche ai mesi estivi (Scenario #R2); conseguentemente si ha un incremento dei carichi flessibili delle abitazioni, essendo sia il riscaldamento sia il raffrescamento considerati carichi accumulabili;
3. l'utilizzo di climatizzatori comporta un maggior impiego di Fonti Energetiche Rinnovabili grazie all'utilizzo della rinnovabile aerotermica; parallelamente aumenta l'autoconsumo nelle abitazioni dotate di impianti fotovoltaici, con conseguente diminuzione dell'energia elettrica ceduta alla rete;
4. avendo ricostruito le curve di carico dell'aggregato, l'analisi delle stesse evidenzia un incremento generalizzato dei consumi elettrici, con incremento dei picchi di domanda in alcuni casi molto importante.

6 Analisi di scenari evolutivi per le abitazioni – Gli effetti potenziali del Superbonus 110%

Per il settore edilizio italiano è in atto un'intensa attività di riqualificazione energetica, incentivata dal cosiddetto "Superbonus 110%".

Il Superbonus è un'agevolazione introdotta dal Decreto Rilancio (D.Lgs. 19 maggio 2020, n. 34) che ha innalzato al 110% l'aliquota di detrazione delle spese sostenute per specifici interventi in ambito di efficienza energetica, di interventi antisismici, di installazione di impianti fotovoltaici o delle infrastrutture per la ricarica di veicoli elettrici negli edifici. Le misure previste si aggiungono alle detrazioni previste per gli interventi di recupero del patrimonio edilizio, compresi quelli per la riduzione del rischio sismico (c.d. Sismabonus) e di riqualificazione energetica degli edifici (cd. Ecobonus).

Gli interventi agevolabili sono suddivisi in interventi principali o trainanti e in interventi aggiuntivi o trainati.

Alla categoria degli interventi trainanti appartengono:

- interventi di isolamento termico sull'involucro edilizio;
- sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale sulle parti comuni;
- sostituzione di impianti di climatizzazione invernale sugli edifici unifamiliari o sulle unità immobiliari di edifici plurifamiliari funzionalmente indipendenti.

Oltre agli interventi trainanti sopra elencati, rientrano nel Superbonus anche le spese per interventi eseguiti insieme ad almeno uno degli interventi principali di isolamento termico, di sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale o di riduzione del rischio sismico; si tratta di:

- interventi di efficientamento energetico;
- installazione di impianti solari fotovoltaici;
- infrastrutture per la ricarica di veicoli elettrici.

La misura della detrazione, riconosciuta al 110% delle spese sostenute, ha come effetto nuovo rispetto al passato e rispetto ad altre misure di incentivazione quello di svincolare il dimensionamento di alcuni sistemi impiantistici da un calcolo di ottimizzazione.

Il risultato che spesso ne consegue è un sovradimensionamento dell'impianto fotovoltaico che diventa il più grande possibile, compatibilmente con gli spazi a disposizione, e di conseguenza dei sistemi di accumulo ad esso asserviti.

A partire dal database delle abitazioni, sono state effettuate delle simulazioni volte a valutare gli effetti sui consumi energetici di una riqualificazione complessiva delle residenze mantenendo gli attuali vettori energetici (per il riscaldamento e la preparazione di acqua calda sanitaria) e con totale elettrificazione delle utenze; in particolare gli scenari simulati sono i seguenti:

1. **Scenario #R3**, consistente nella riqualificazione integrale dell'involucro edilizio, con introduzione di generatori di calore a condensazione in sostituzione dei generatori a gas di tipo tradizionale e installazione di impianto fotovoltaico con accumulo;
2. **Scenario #R4**, consistente nella riqualificazione integrale dell'involucro edilizio, con introduzione di generatori di calore a pompa di calore in sostituzione dei generatori a gas di tipo tradizionale e installazione di impianto fotovoltaico con accumulo.

Nei paragrafi che seguono sono illustrati i risultati delle simulazioni, focalizzando l'attenzione dapprima sui dati complessivi annuali dei consumi di energia primaria e dei consumi di gas e di energia elettrica e successivamente analizzando l'andamento mensile a seguito degli interventi di riqualificazione.

I risultati delle simulazioni vengono poi analizzati al fine di arrivare alla definizione di benchmark di consumo per gli scenari individuati.

6.1 Scenario #R3 – Riqualificazione integrale dell’abitazione con mantenimento dei vettori energetici

Lo scenario #R3 è stato simulato al fine di valutare i potenziali effetti di una riqualificazione energetica, con mantenimento dei vettori energetici attuali.

In particolare, le ipotesi alla base delle simulazioni condotte sono le seguenti:

- isolamento di tutto l’involucro edilizio fino al raggiungimento dei valori limite di trasmittanza;
- sostituzione dei generatori di calore a gas di tipo tradizionale per il riscaldamento con caldaie a condensazione;
- sostituzione del sistema di regolazione;
- utilizzo dei condizionatori esistenti come generatore prioritario per il riscaldamento;
- installazione di un impianto fotovoltaico, con potenza massima in funzione dello spazio a disposizione;
- installazione di una batteria di accumulo di capacità determinata sulla base del maggiore tra:
 - 7,2 kWh;
 - consumo giornaliero medio;
 - produzione giornaliera media;
- mantenimento degli elettrodomestici esistenti;
- mantenimento dell’impianto di illuminazione esistente;
- mantenimento del vettore energetico esistente per il piano cottura e per il forno.

6.1.1 Consumi di energia primaria complessivi

Gli interventi proposti comportano una riduzione generale dei consumi di energia primaria delle abitazioni.

Per lo Scenario #R3, con le modalità già usate in precedenza, è stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di energia primaria complessivi, considerando il consumo per unità di superficie per le classi dimensionali individuate.

Per questo scenario, i consumi di energia primaria per unità di superficie risultano mediamente pari a 63,6 kWh/m²; il primo quartile ha consumi di energia primaria per unità di superficie inferiori a 49,9 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 62,3 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 75,9 kWh/m².

In Figura 6.1 e in Tabella 6.1, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

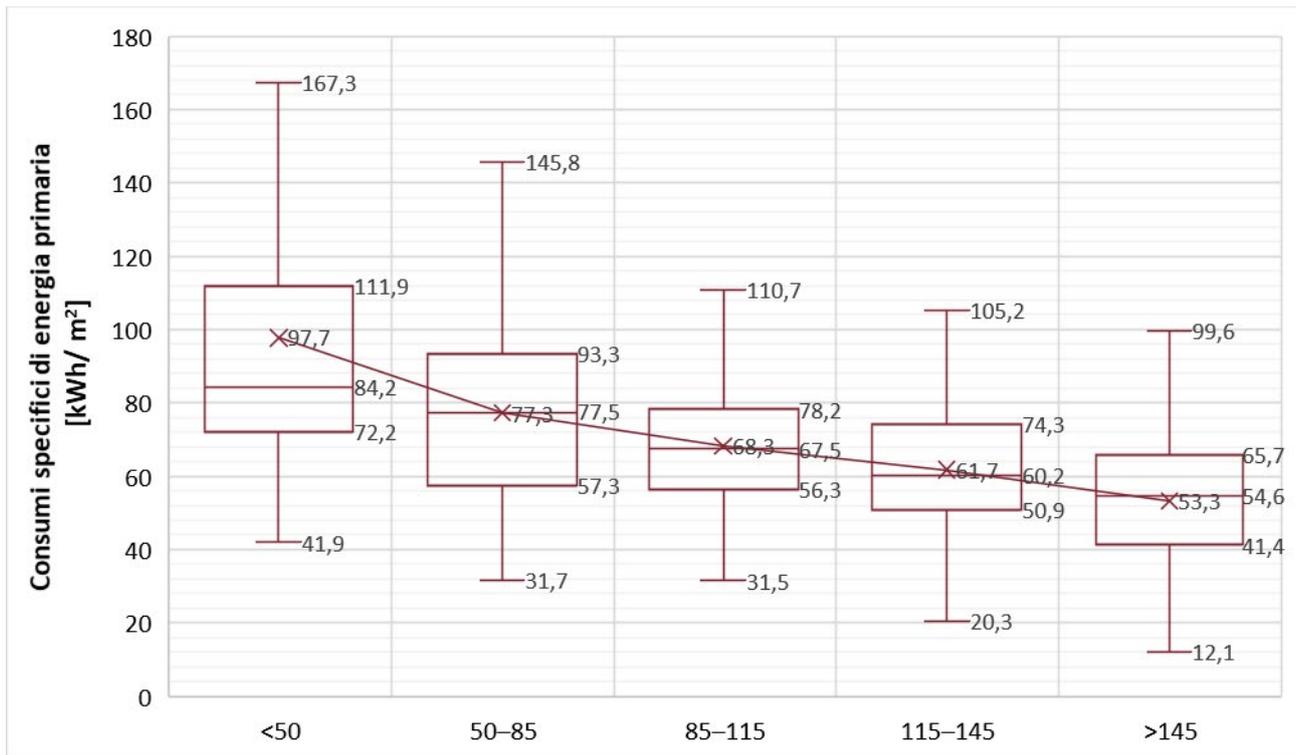


Figura 6.1 – Consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

Si osserva, per tutte le classi dimensionali, un'importante riduzione dei consumi di energia primaria, con una diminuzione media del 59,7% rispetto allo scenario #R0; tale riduzione è ugualmente significativa per le diverse classi dimensionali.

Tabella 6.1 – Consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m²]	Scenario #R3 [kWh/m²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m²)	254,7	97,7	-61,6%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m²)	182,8	77,3	-57,7%
Abitazioni medie (85-115 m²)	167,2	68,3	-59,2%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m²)	154,4	61,7	-60,0%
Abitazioni grandi (> 145 m²)	133,3	53,3	-60,0%
Tutte le abitazioni	157,9	63,6	-59,7%

6.1.2 Emissioni inquinanti dell'abitazione

Per lo Scenario #R3, è stata effettuata anche una valutazione parametrica delle emissioni inquinanti complessive, considerando le emissioni inquinanti per unità di superficie per le classi dimensionali individuate.

Per questo scenario, le emissioni inquinanti per unità di superficie risultano mediamente pari a 6,2 kg/m², con una diminuzione del 77,2% rispetto allo scenario #R0; il primo quartile ha emissioni inquinanti per unità di superficie inferiori a 3,9 kg/m²; il secondo quartile inferiori a 6,2 kg/m²; il terzo quartile inferiori a 8,9 kg/m².

In Figura 6.2 e in Tabella 6.2, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportate le emissioni inquinanti complessive per unità di superficie.

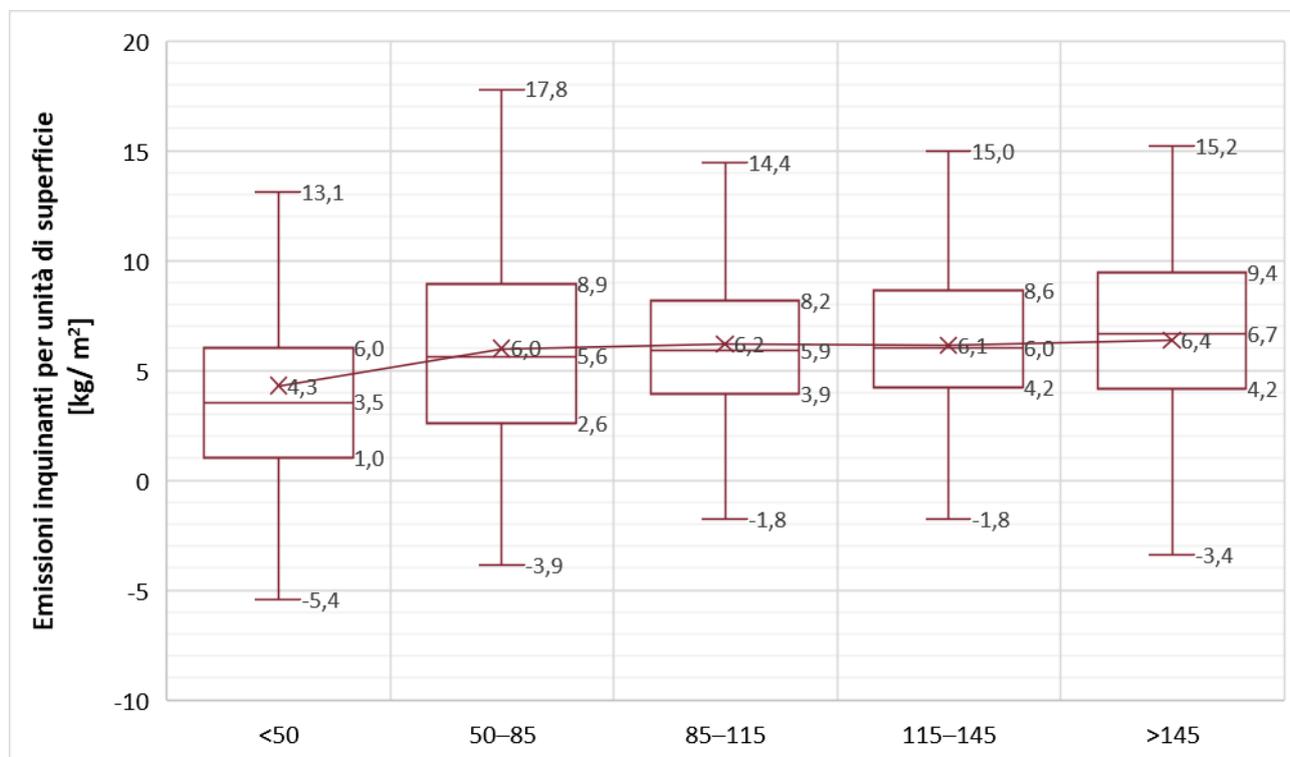


Figura 6.2 – Emissioni inquinanti per unità di superficie.

Tabella 6.2 – Emissioni inquinanti per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kg/m²]	Scenario #R1 [kg/m²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m²)	40,5	4,3	-89,4%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m²)	30,6	6	-80,4%
Abitazioni medie (85-115 m²)	28,5	6,2	-78,2%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m²)	26,6	6,1	-77,1%
Abitazioni grandi (> 145 m²)	23,4	6,4	-72,6%
Tutte le abitazioni	27,0	6,2	-77,2%

6.1.3 Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)

Per lo Scenario #R3, è stata anche effettuata una valutazione della quota di energia rinnovabile utilizzata nelle abitazioni, come rapporto tra i consumi di energia primaria coperti mediante FER e i consumi di energia primaria complessivi.

Per questo scenario, la quota di energia rinnovabile risulta mediamente pari al 33,5%, con una crescita notevole (25,5%) rispetto allo scenario #R0, dovuta alla presenza degli impianti fotovoltaici con accumulo (in larga parte) e all'utilizzo della risorsa aerotermica da parte dei generatori a pompa di calore, ove presenti; il primo quartile delle abitazioni impiega FER per una quota inferiore al 23,1% dei propri consumi; il secondo quartile per una quota inferiore al 32,2%; il terzo quartile per una quota inferiore al 41,9%.

Come riportato in Figura 6.3 e in Tabella 6.3 la quota di FER impiegata è più grande per le abitazioni piccole (44,0%) e medio-piccole (42,6%), rimanendo più bassa per le abitazioni più grandi (36,3% per le medie, 33,9% per le medio-grandi, 25,8% per le grandi).

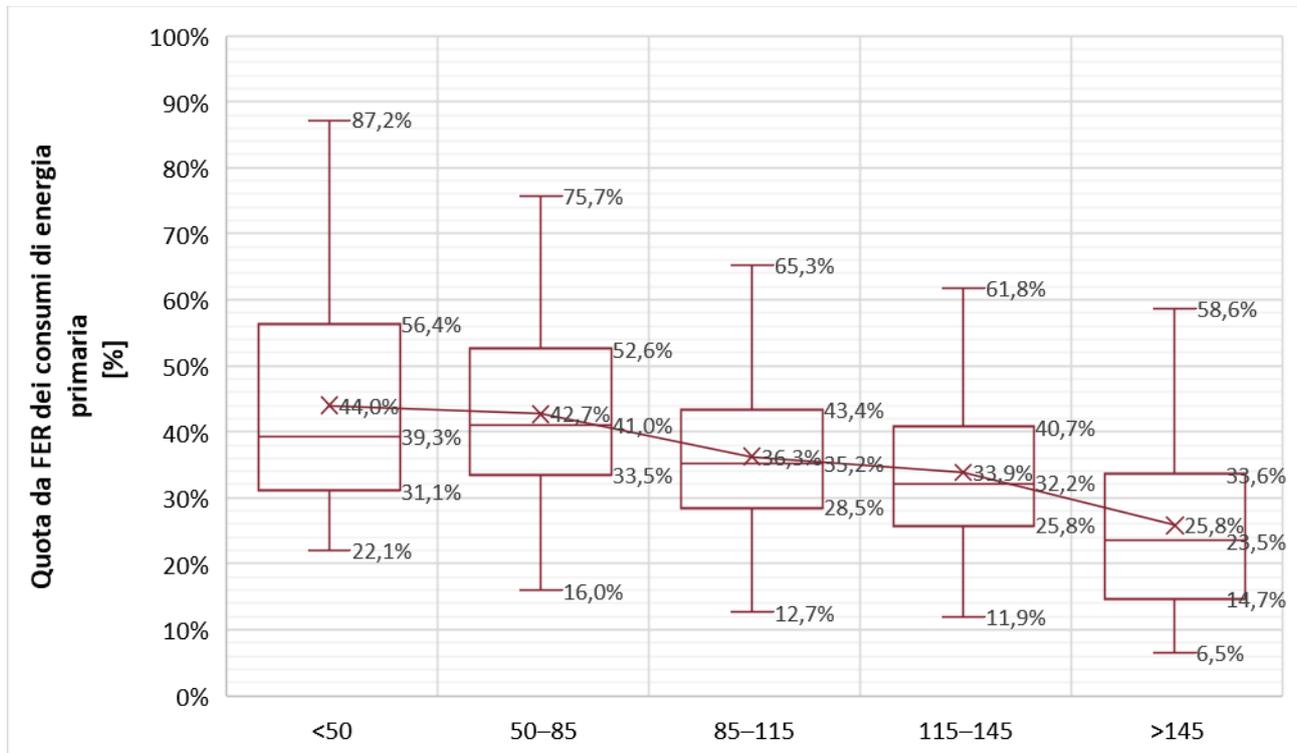


Figura 6.3 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione delle classi dimensionali individuate.

Tabella 6.3 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione delle classi dimensionali individuate.

	Scenario #R0 [%]	Scenario #R3 [%]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	11,3%	44,0%	32,7%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	10,0%	42,7%	32,7%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	8,5%	36,3%	27,8%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	7,8%	33,9%	26,1%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	6,4%	25,8%	19,4%
Tutte le abitazioni	8,0%	33,5%	25,5%

L'aggiunta di impianti fotovoltaici con accumulo, spesso sovradimensionati, comporta un deciso incremento dell'autoproduzione di energia elettrica; questa disponibilità è in parte autoconsumata e in parte ceduta alla rete elettrica; la quota autoconsumata, come si è visto, comporta una decisa crescita della quota FER nei consumi energetici delle abitazioni.

Parallelamente, si ha una significativa cessione alla rete di una parte dell'energia elettrica autoprodotta, in conseguenza del fatto che, in questo scenario, sono stati mantenuti i vettori energetici dello scenario #R0 per i generatori di calore e per la cucina.

L'energia complessivamente esportata passa dall'1,1% all'11,7% dei consumi complessivi di energia primaria delle abitazioni.

6.1.4 Consumi di gas

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di gas, considerando il consumo per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

Per lo scenario simulato #R3 (Figura 6.4), i consumi di gas per unità di superficie sono mediamente pari a 4,5 Sm³/m²; il primo quartile ha consumi di gas per unità di superficie inferiori a 3,1 Sm³/m²; il secondo quartile inferiori a 4,3 Sm³/m²; il terzo quartile inferiori a 5,7 Sm³/m².

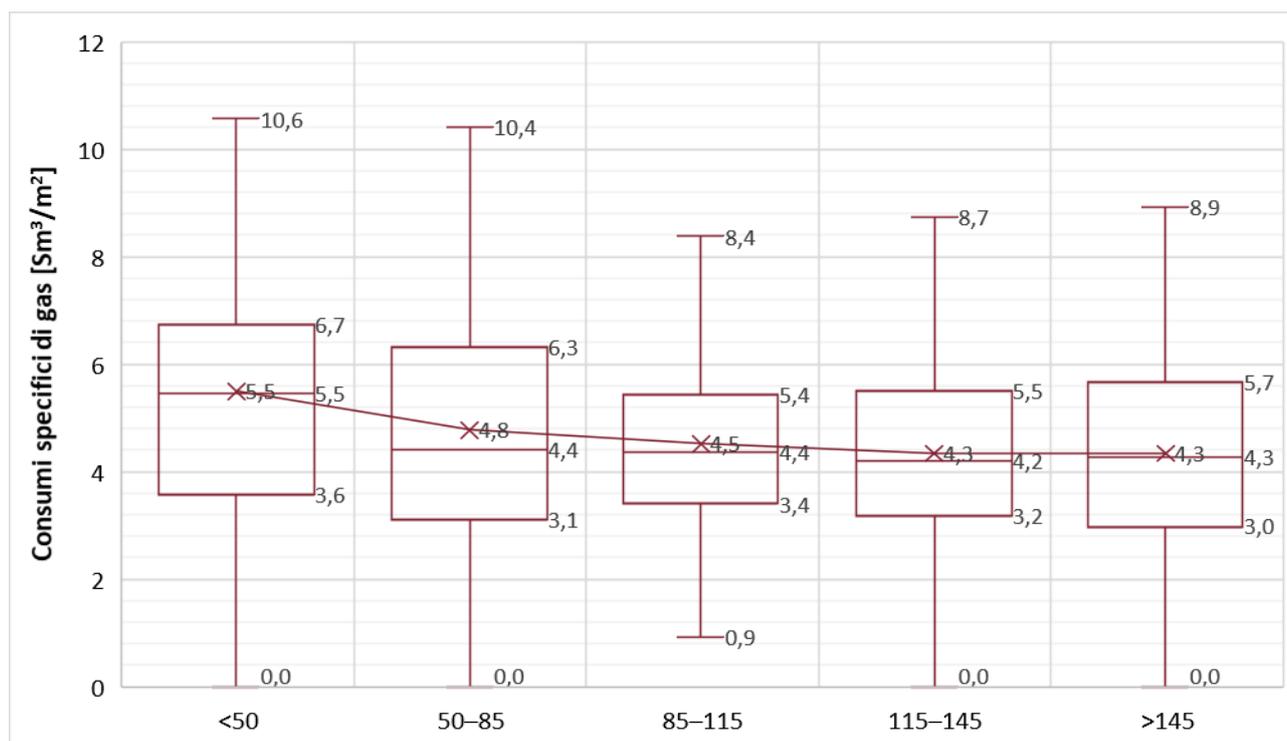


Figura 6.4 – Consumi di gas per unità di superficie.

Si osserva (Tabella 6.4), per tutte le classi dimensionali, un'importante riduzione dei consumi di gas, con una diminuzione media del 55,2% rispetto allo scenario #R0; tale riduzione è ugualmente significativa per le diverse classi dimensionali.

Tabella 6.4 – Consumi complessivi di gas per unità di superficie.

	Scenario #R0 [Sm ³ /m ²]	Scenario #R3 [Sm ³ /m ²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	12,0	5,5	-54,2%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	9,4	4,8	-48,9%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	10,0	4,5	-55,0%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	9,9	4,3	-56,6%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	10,1	4,3	-57,4%
Tutte le abitazioni	10,0	4,5	-55,2%

In Tabella 6.5 e in Figura 6.5, sono riportati, con dettaglio mensile, i consumi di gas per l'intero database delle 1545 abitazioni. Come conseguenza degli interventi simulati con lo scenario #R3, si osserva un'importante riduzione dei consumi di gas nei mesi invernali.

Tabella 6.5 – Consumi complessivi di gas per le 1545 abitazioni.

		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Scenario #R0	[Sm ³]	435.763	382.810	309.266	101.206	43.950	45.512	45.384	43.797	39.458	46.359	276.260	411.970
Scenario #R3	[Sm ³]	160.897	139.927	112.304	57.005	43.925	45.493	45.365	43.775	39.428	41.524	103.530	149.991
Differenza #R3 - #R0	[Sm ³]	-274.866	-242.883	-196.962	-44.201	-25	-19	-19	-22	-30	-4.835	-172.730	-261.980
	[%]	-63,1%	-63,4%	-63,7%	-43,7%	-0,1%	0,0%	0,0%	-0,1%	-0,1%	-10,4%	-62,5%	-63,6%

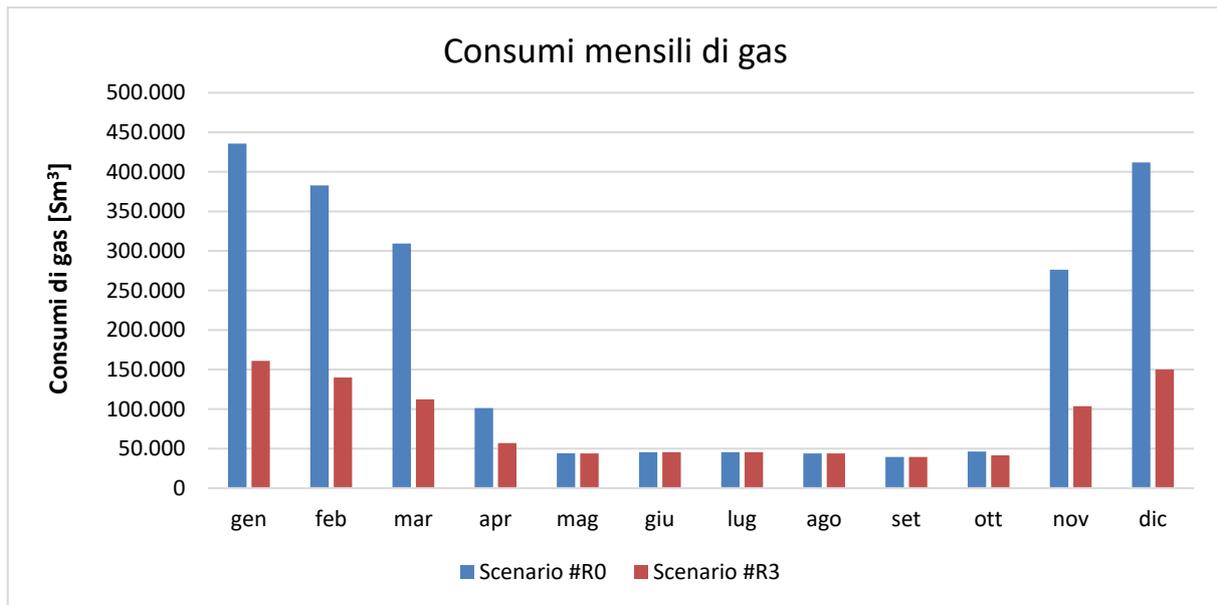


Figura 6.5 – Consumi complessivi di gas per le 1545 abitazioni.

6.1.5 Consumi di energia elettrica

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di energia elettrica, considerando il consumo per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

Per lo scenario simulato #R3 (Figura 6.6), i consumi di energia elettrica per unità di superficie sono mediamente pari a 2,3 kWh/m²; il primo quartile ha consumi di energia elettrica per unità di superficie inferiori a 1,3 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 2,0 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 2,8 kWh/m².

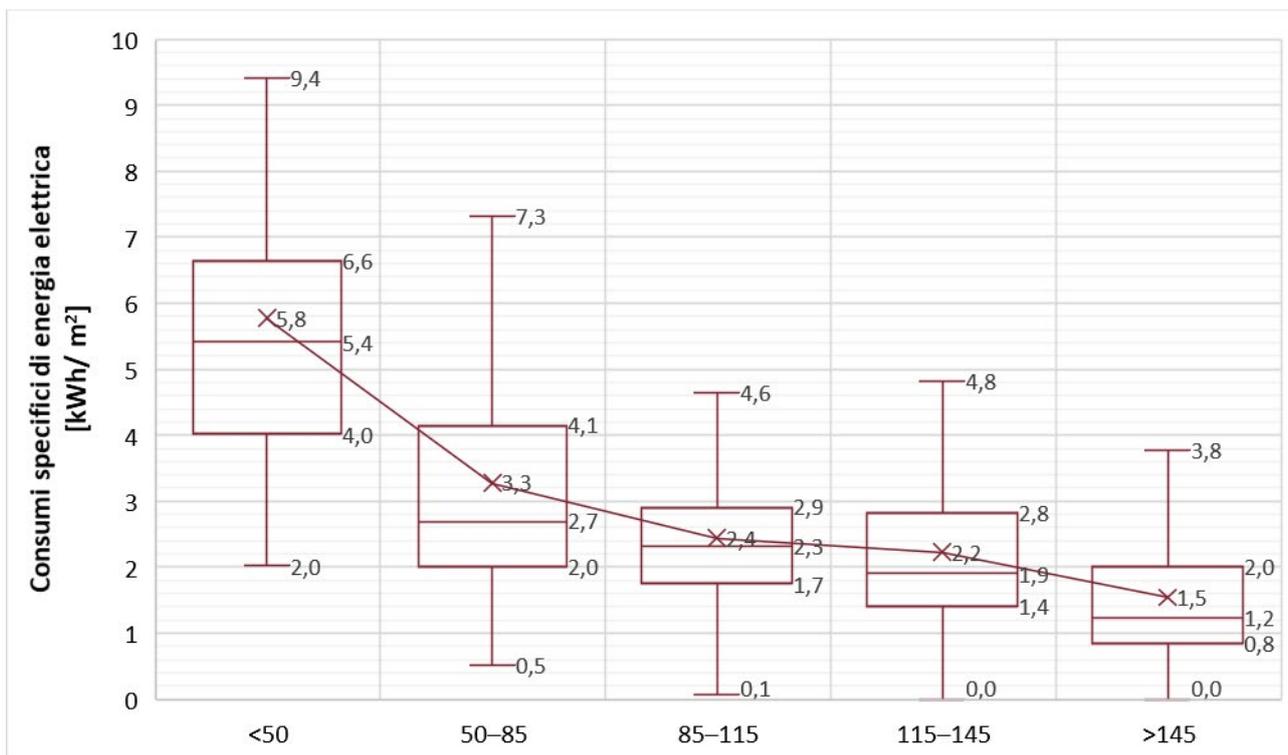


Figura 6.6 – Consumi di energia elettrica per unità di superficie.

Si osserva (Tabella 6.6), per tutte le classi dimensionali, un’importante riduzione dei consumi di energia elettrica, con una diminuzione media del 90,9% rispetto allo scenario #R0; tale riduzione è ugualmente significativa per le diverse classi dimensionali.

Tabella 6.6 – Consumi complessivi di energia elettrica per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m²]	Scenario #R3 [kWh/m²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m²)	58,6	5,8	-90,1%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m²)	37,3	3,3	-91,2%
Abitazioni medie (85-115 m²)	28,5	2,4	-91,6%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m²)	23,5	2,2	-90,6%
Abitazioni grandi (> 145 m²)	14,4	1,5	-89,6%
Tutte le abitazioni	25,0	2,3	-90,9%

In Tabella 6.5 e in Figura 6.5, sono riportati, con dettaglio mensile, i consumi di energia elettrica per l’intero database delle 1545 abitazioni. Come conseguenza degli interventi simulati con lo scenario #R3, si osserva un’importante riduzione dei consumi di energia elettrica.

In particolare, si osserva come la produzione di energia elettrica degli impianti fotovoltaici consenta praticamente di azzerare i consumi elettrici dei mesi che vanno da marzo a ottobre.

Tabella 6.7 – Consumi complessivi di gas per le 1545 abitazioni.

		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Scenario #R0	[kWh]	402.790	360.151	387.682	352.672	352.166	351.598	403.804	401.703	344.126	351.773	374.611	400.736
Scenario #R3	[kWh]	138.212	53.709	5.794	16	0	0	424	375	223	980	93.925	140.194
Differenza #R3 - #R0	[kWh]	-264.578	-306.442	-381.888	-352.656	-352.166	-351.598	-403.380	-401.328	-343.902	-350.793	-280.686	-260.543
	[%]	-65,7%	-85,1%	-98,5%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-99,9%	-99,9%	-99,9%	-99,7%	-74,9%	-65,0%

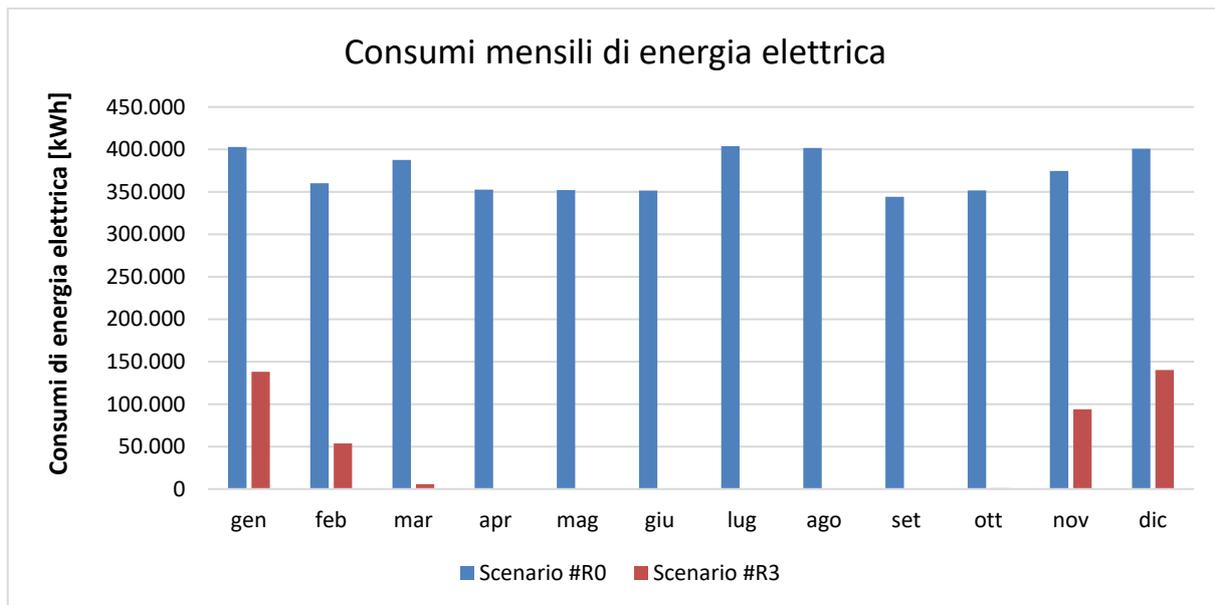


Figura 6.7 – Consumi complessivi di energia elettrica per le 1545 abitazioni.

6.2 Scenario #R4 – Riqualficazione integrale dell'abitazione con totale elettrificazione delle utenze

Lo scenario #R4 è stato simulato al fine di valutare i potenziali effetti di una riqualficazione energetica, con elettrificazione totale delle utenze.

In particolare, le ipotesi alla base delle simulazioni condotte sono le seguenti:

- isolamento di tutto l'involucro edilizio fino al raggiungimento dei valori limite di trasmittanza;
- sostituzione dei generatori di calore a gas con pompe di calore elettriche;
- sostituzione del sistema di regolazione;
- sostituzione dei generatori per acqua calda sanitaria con scaldabagni a pompa di calore;
- installazione di impianto fotovoltaico, con potenza massima in funzione dello spazio a disposizione;
- installazione di una batteria di accumulo di capacità determinata sulla base del maggiore tra:
 - 7,2 kWh;
 - consumo giornaliero medio;
 - produzione giornaliera media;
- mantenimento degli elettrodomestici esistenti;
- mantenimento dell'impianto di illuminazione esistente;
- sostituzione dei piani cottura con piani di cottura elettrici del tipo a induzione;
- sostituzione dei forni a gas con forni elettrici.

6.2.1 Consumi di energia primaria complessivi

Gli interventi proposti comportano una riduzione generale dei consumi di energia primaria delle abitazioni. Per lo Scenario #R4, con le modalità già usate in precedenza, è stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di energia primaria complessivi, considerando il consumo per unità di superficie per le classi dimensionali individuate.

Per questo scenario, i consumi di energia primaria per unità di superficie risultano mediamente pari a 51,3 kWh/m²; il primo quartile ha consumi di energia primaria per unità di superficie inferiori a 38,2 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 48,9 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 62,1 kWh/m². In Figura 6.8 e in Tabella 6.8, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportati i consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

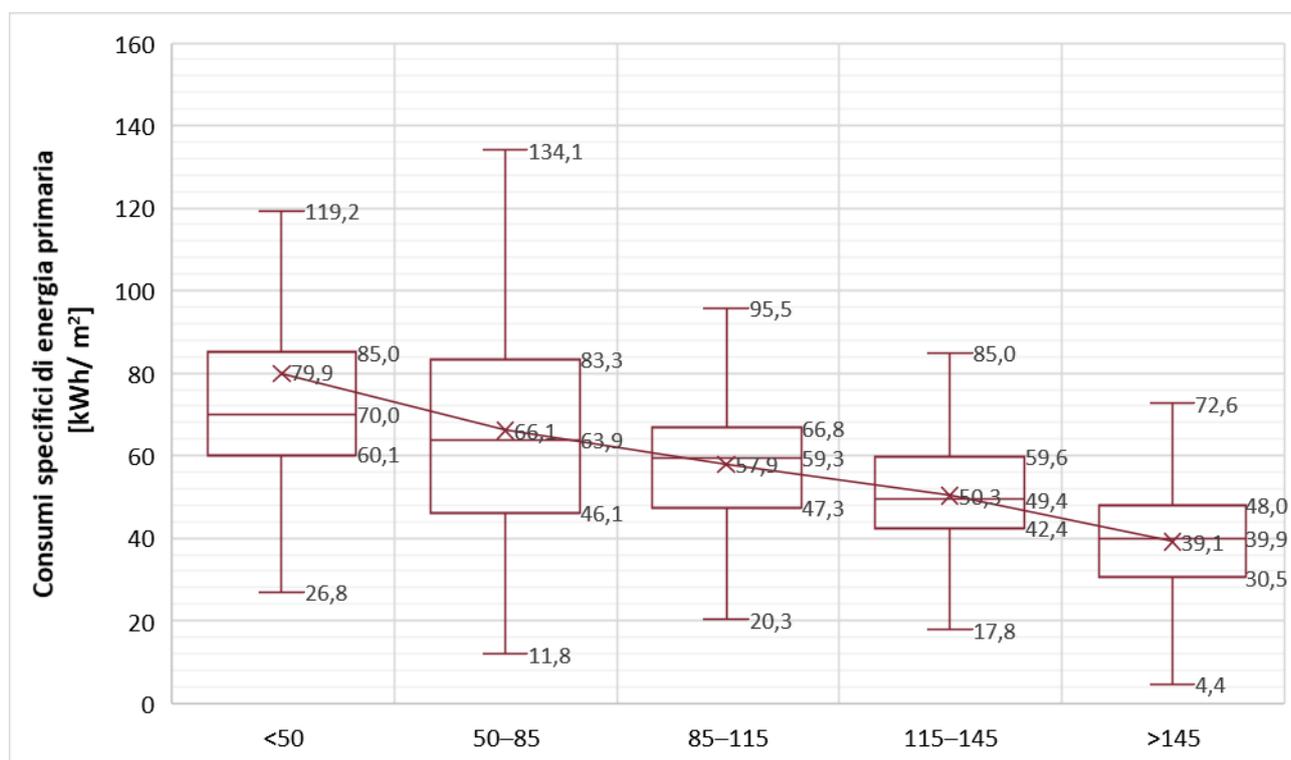


Figura 6.8 – Consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

Si osserva, per tutte le classi dimensionali, un'importante riduzione dei consumi di energia primaria, con una diminuzione media del 67,5% rispetto allo scenario #R0; tale riduzione è maggiormente significativa (-75,0%) per le abitazioni più grandi. Tale riduzione è anche superiore rispetto a quella vista per lo scenario #R3.

Tabella 6.8 – Consumi complessivi di energia primaria per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m ²]	Scenario #R4 [kWh/m ²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	254,7	69,2	-72,8%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	182,8	57,8	-68,4%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	167,2	50,6	-69,7%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	154,4	43,5	-71,8%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	133,3	33,3	-75,0%
Tutte le abitazioni	157,9	51,3	-67,5%

6.2.2 Emissioni inquinanti dell'abitazione

Per lo Scenario #R4, è stata effettuata anche una valutazione parametrica delle emissioni inquinanti complessive, considerando le emissioni inquinanti per unità di superficie per le classi dimensionali individuate.

Per questo scenario, le emissioni inquinanti per unità di superficie risultano mediamente pari a 26,1 kg/m², con una diminuzione del 90,3% rispetto allo scenario #R0; il primo quartile ha emissioni inquinanti per unità di superficie inferiori a 1,1 kg/m²; il secondo quartile inferiori a 3,2 kg/m²; il terzo quartile inferiori a 4,8 kg/m². Per le abitazioni piccole, in virtù dell'esportazione di energia elettrica, si ha un bilancio delle emissioni negativo.

In Figura 6.9 e in Tabella 6.9, in funzione delle classi dimensionali individuate sono riportate le emissioni inquinanti complessive per unità di superficie.

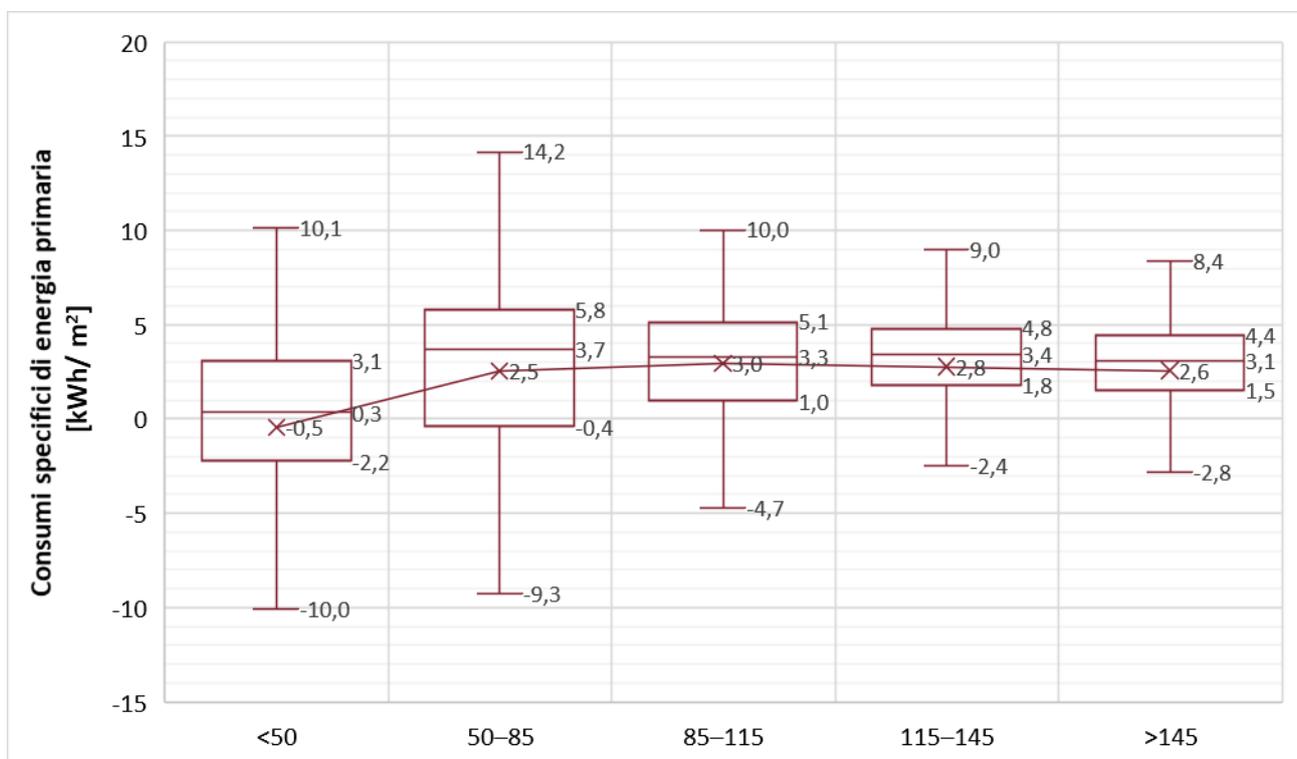


Figura 6.9 – Emissioni inquinanti per unità di superficie.

Tabella 6.9 – Emissioni inquinanti per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kg/m ²]	Scenario #R1 [kg/m ²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	40,5	-0,5	-101,2%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	30,6	2,5	-91,8%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	28,5	3	-89,5%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	26,6	2,8	-89,5%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	23,4	2,6	-88,9%
Tutte le abitazioni	27,0	2,6	-90,3%

6.2.3 Uso di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)

Per lo Scenario #R4, è stata anche effettuata una valutazione della quota di energia rinnovabile utilizzata nelle abitazioni, come rapporto tra i consumi di energia primaria coperti mediante FER e i consumi di energia primaria complessivi.

Per questo scenario, la quota di energia rinnovabile risulta mediamente pari al 64,5%, con una crescita notevole (56,5%) rispetto allo scenario #R0, dovuta alla presenza degli impianti fotovoltaici con accumulo (in larga parte) e all'utilizzo della risorsa aerotermica da parte dei generatori a pompa di calore, ove presenti; il primo quartile delle abitazioni impiega FER per una quota inferiore al 56,9% dei propri consumi; il secondo quartile per una quota inferiore al 62,5%; il terzo quartile per una quota inferiore al 70,7%.

Come riportato in Figura 6.10 e in Tabella 6.10, la quota di FER impiegata è più grande per le abitazioni piccole (68,9%) e medio-piccole (68,3%), andando a diminuire al crescere della dimensione delle abitazioni (64,5% per le medie, 64,1% per le medio-grandi, 62,3% per le grandi).

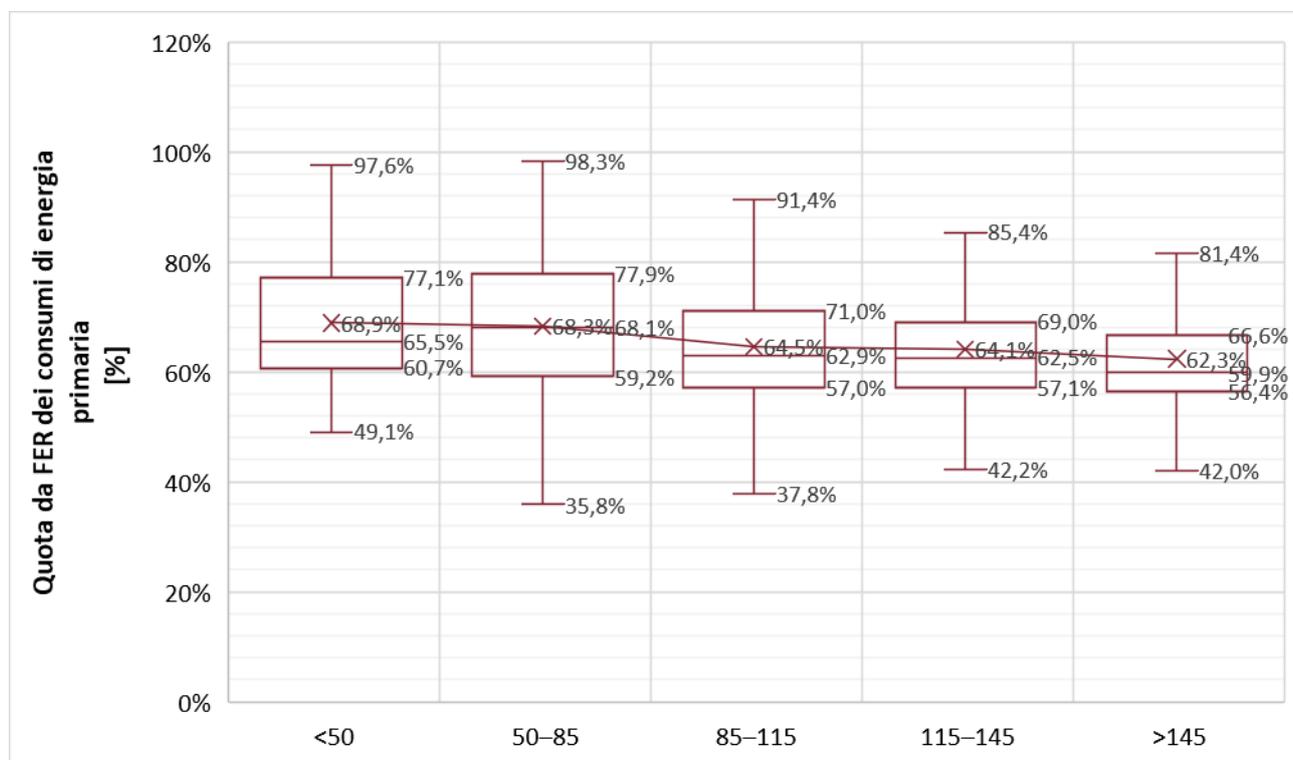


Figura 6.10 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione delle classi dimensionali individuate.

Tabella 6.10 – Quota da FER dei consumi di energia primaria in funzione delle classi dimensionali individuate.

	Scenario #R0 [%]	Scenario #R4 [%]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	11,3%	68,9%	57,6%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	10,0%	68,3%	58,3%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	8,5%	64,5%	56,0%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	7,8%	64,1%	56,3%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	6,4%	62,3%	55,9%
Tutte le abitazioni	8,0%	64,5%	56,5%

L'aggiunta di impianti fotovoltaici con accumulo, spesso sovradimensionati, comporta un deciso incremento dell'autoproduzione di energia elettrica; questa disponibilità è in parte autoconsumata e in parte ceduta alla rete elettrica; la quota autoconsumata, come si è visto, comporta una decisa crescita della quota FER nei consumi energetici delle abitazioni, risultando tale crescita comunque inferiore rispetto a quanto visto per lo Scenario #R3.

In questo scenario, è stata considerata la totale elettrificazione delle utenze e quindi cresce l'energia elettrica autoconsumata e, di conseguenza, diminuisce l'energia elettrica complessivamente esportata.

L'energia complessivamente esportata passa dall'1,1% dello Scenario #R0 al 6,8% dei consumi complessivi di energia primaria delle abitazioni, rimanendo al di sotto di quanto osservato per lo Scenario #R3 (11,7%).

6.2.4 Consumi di gas

Lo scenario #R4 prevede la totale elettrificazione dei consumi delle abitazioni. Pertanto, i consumi di gas risultano nulli.

6.2.5 Consumi di energia elettrica

E' stata effettuata una valutazione parametrica dei consumi di energia elettrica, considerando il consumo per unità di superficie in funzione delle classi dimensionali individuate.

Per lo scenario simulato #R4 (Figura 6.11), i consumi di energia elettrica per unità di superficie sono mediamente pari a 11,9 kWh/m²; il primo quartile ha consumi di energia elettrica per unità di superficie inferiori a 7,7 kWh/m²; il secondo quartile inferiori a 11,3 kWh/m²; il terzo quartile inferiori a 15,1 kWh/m².

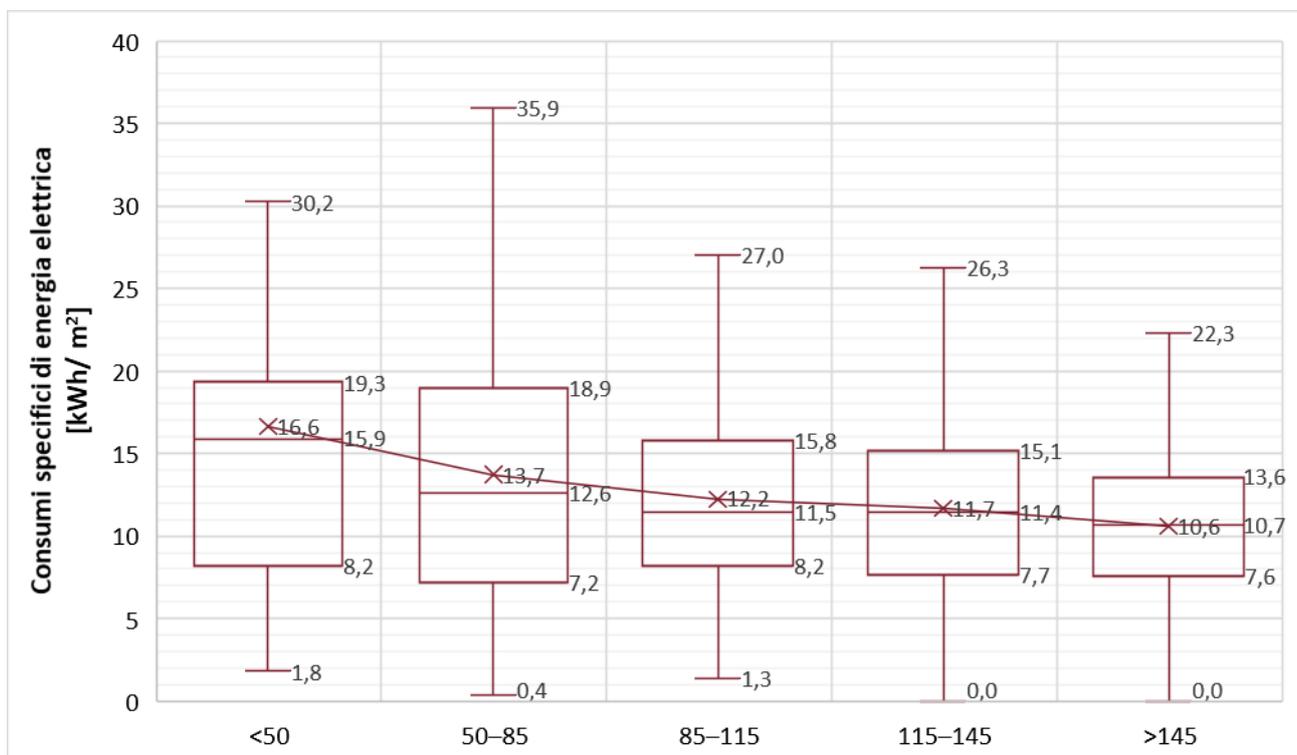


Figura 6.11 – Consumi di energia elettrica per unità di superficie.

Si osserva (Tabella 6.11), per tutte le classi dimensionali, un'importante riduzione dei consumi di energia elettrica, con una diminuzione media del 52,6% rispetto allo scenario #R0; tale riduzione è maggiormente significativa per le abitazioni piccole (-71,7%) rispetto alle abitazioni grandi (-26,9); ciò dipende dalla minore

importanza dei consumi di riscaldamento (che in questo scenario vengono elettrificati) nelle abitazioni piccole rispetto alle abitazioni grandi.

Tabella 6.11 – Consumi complessivi di gas per unità di superficie.

	Scenario #R0 [kWh/m ²]	Scenario #R3 [kWh/m ²]	Differenza [%]
Abitazioni piccole (< 50 m ²)	58,6	16,6	-71,7%
Abitazioni medio-piccole (50-85 m ²)	37,3	13,7	-63,3%
Abitazioni medie (85-115 m ²)	28,5	12,2	-57,2%
Abitazioni medio-grandi (115-145 m ²)	23,5	11,7	-50,2%
Abitazioni grandi (> 145 m ²)	14,4	10,6	-26,4%
Tutte le abitazioni	25	11,9	-52,6%

In Figura 6.12 e in Tabella 6.12, sono riportati, con dettaglio mensile, i consumi di energia elettrica per l'intero database delle 1545 abitazioni. Come conseguenza degli interventi simulati con lo scenario #R4, si osserva una riduzione dei consumi di energia elettrica, con importanti differenze tra i diversi mesi dell'anno.

In particolare, si osserva un incremento dei consumi elettrici nei mesi estivi, come conseguenza dell'elettrificazione dei consumi di riscaldamento, mentre la produzione di energia elettrica degli impianti fotovoltaici consente di diminuire fortemente i consumi elettrici dei mesi che vanno da marzo a ottobre.

Tabella 6.12 – Consumi complessivi di gas per le 1545 abitazioni.

		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Scenario #R0	[kWh]	402.790	360.151	387.682	352.672	352.166	351.598	403.804	401.703	344.126	351.773	374.611	400.736
Scenario #R4	[kWh]	547.076	407.221	267.887	75.799	25.404	22.730	35.214	38.611	58.545	123.487	378.879	528.079
Differenza #R4 - #R0	[kWh]	142.707	45.727	-120.912	-277.137	-326.761	-328.866	-368.589	-363.090	-285.579	-228.375	3.451	125.936
	[%]	35,3%	12,6%	-31,1%	-78,5%	-92,8%	-93,5%	-91,3%	-90,4%	-83,0%	-64,9%	0,9%	31,3%

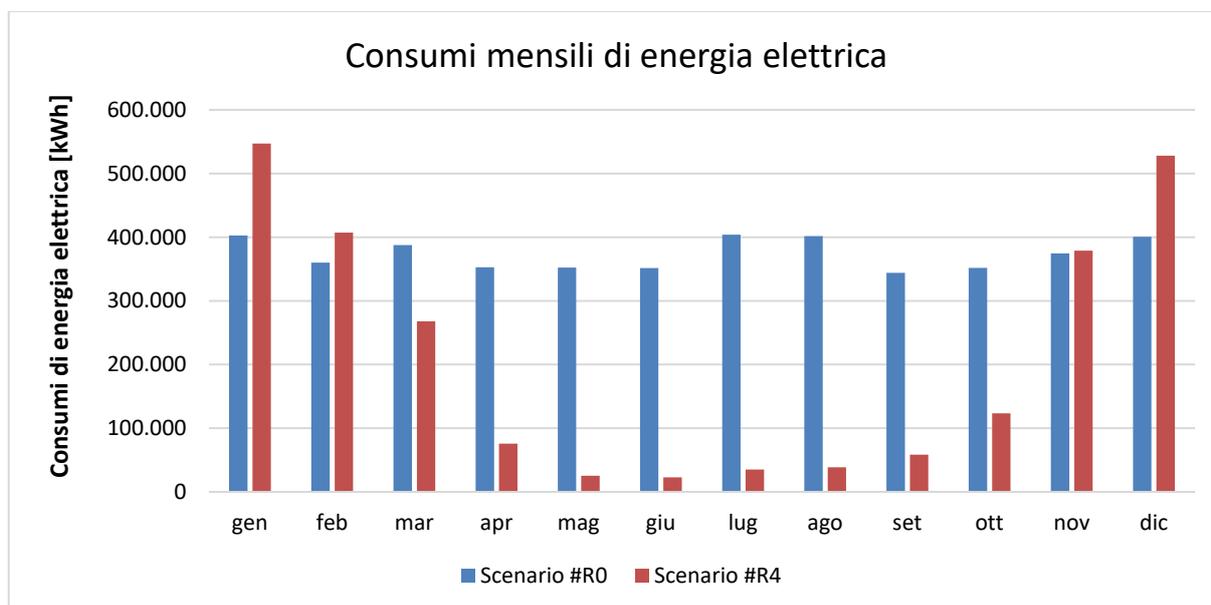


Figura 6.12 – Consumi complessivi di energia elettrica per le 1545 abitazioni.

6.3 Definizione di benchmark per le abitazioni riqualificate

Analogamente a quanto effettuato per la situazione esistente, con l'intenzione di arrivare alla definizione di benchmark di consumo per le residenze italiane, anche per gli scenari #R3 e #R4 sono state eseguite delle analisi sul database volte a valutare eventuali correlazioni tra i dati di output della simulazione (consumi di energia primaria, consumi di gas, consumi di energia elettrica, carichi accumulabili, emissioni inquinanti, uso di Fonti Energetiche Rinnovabili) e variabili di input significative (superficie dell'abitazione, numero di occupanti, gradi giorno).

Le suddette analisi statistiche sono state effettuate utilizzando lo strumento di analisi dei dati di Excel.

Le analisi sono state condotte raggruppando le abitazioni in funzione del numero di occupanti e per classi dimensionali, avendo individuato 5 classi dimensionali (abitazione piccola <50 m²; abitazione medio-piccola 50-85 m²; abitazione media 85-115 m²; abitazione medio-grande 115-145 m²; abitazione grande >145 m²).

I risultati delle correlazioni individuate saranno mostrati di volta in volta utilizzando la seguente nomenclatura:

- CG sono i consumi di gas espressi in Sm³/anno;
- CE sono i consumi di energia elettrica espressi in kWh/anno;
- CP sono i consumi di energia primaria espressi in kWh/anno;
- ACC sono i carichi elettrici accumulabili, espressi in kWh/anno;
- Elnq sono le emissioni inquinanti in termini di anidride carbonica equivalente espresse kg/anno;
- FER% è la quota dei consumi di energia primaria coperta da Fonti Energetiche Rinnovabili (FER), espressa in percentuale;
- S è la superficie utile dell'abitazione espressa in m²;
- N è il numero massimo di occupanti dell'abitazione;
- GG sono i gradi giorno della località.

6.3.1 Benchmark per lo Scenario #R3

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per i consumi di gas dell'abitazione, per i consumi di energia elettrica, per i consumi di energia primaria, per i carichi accumulabili, per le emissioni inquinanti e per la quota di utilizzo di Fonti Energetiche Rinnovabili, con il significato dei simboli sopra definito.

$$CG = -603,15 + 3,0241 \cdot S + 10,440 \cdot N + 0,47132 \cdot GG \quad (6.1)$$

$$CG = 157,77 + 3,5450 \cdot S - 12,937 \cdot N \quad (6.2)$$

Nella (6.1) i consumi di gas sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una correlazione molto buona (R multiplo= 0,80); nella (6.2) i consumi di gas sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una buona correlazione (R multiplo= 0,72) sebbene minore della precedente.

$$CE = 146,25 + 0,49052 \cdot S + 33,777 \cdot N - 0,028850 \cdot GG \quad (6.3)$$

$$CE = 99,677 + 0,45864 \cdot S + 35,208 \cdot N \quad (6.4)$$

Nella (6.3) i consumi di energia elettrica sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una bassa correlazione (R multiplo= 0,33); nella (6.4) i consumi di energia elettrica sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una bassa correlazione (R multiplo= 0,33).

$$CP = -3985,2 + 27,205 \cdot S + 521,58 \cdot N + 4,2091 \cdot GG \quad (6.5)$$

$$CP = 157,77 + 3,5450 \cdot S - 12,937 \cdot N \quad (6.6)$$

Nella (6.5) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una correlazione buona (R multiplo= 0,74); nella (6.6) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una buona correlazione (R multiplo= 0,67) sebbene minore della precedente.

$$ACC = 490,02 + 0,73753 \cdot S + 52,011 \cdot N - 0,19006 \cdot GG \quad (6.7)$$

$$ACC = 183,189 + 0,52750 \cdot S + 61,438 \cdot N \quad (6.8)$$

Nella (6.7) i carichi accumulabili sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una correlazione molto bassa (R multiplo= 0,17); nella (6.8) i carichi accumulabili sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una correlazione molto bassa (R multiplo= 0,15).

$$EInq = -1193,2 + 3,8767 \cdot S + 21,869 \cdot N + 0,89703 \cdot GG \quad (6.9)$$

$$EInq = 255,05 + 4,8680 \cdot S - 22,623 \cdot N \quad (6.10)$$

Nella (6.9) i carichi differibili sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una discreta correlazione (R multiplo= 0,55); nella (6.10) i carichi differibili sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta una discreta correlazione (R multiplo= 0,45), sebbene più bassa della precedente.

$$FER\% = 0,66546 - 4,8698 \cdot 10^{-4} \cdot S + 7,2007 \cdot 10^{-3} \cdot N - 1,7505 \cdot 10^{-4} \cdot GG \quad (6.11)$$

$$FER\% = 0,38356 - 6,8694 \cdot 10^{-4} \cdot S + 1,5828 \cdot 10^{-2} \cdot N \quad (6.12)$$

Nella (6.11) la quota di utilizzo delle FER è espressa in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una buona correlazione (R multiplo= 0,55); nella (6.12) la quota di utilizzo delle FER è espressa in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta una correlazione discreta (R multiplo= 0,40).

6.3.1 Benchmark per lo Scenario #R4

Utilizzando lo strumento di analisi dati di Excel sono state individuate le seguenti funzioni di regressione per i consumi di gas dell'abitazione, per i consumi di energia elettrica, per i consumi di energia primaria e per i carichi accumulabili, per le emissioni inquinanti e per la quota di utilizzo di Fonti Energetiche Rinnovabili, con il significato dei simboli sopra definito.

$$CE = -939,93 + 6,0913 \cdot S + 37,927 \cdot N + 0,95713 \cdot GG \quad (6.13)$$

$$CE = 605,30 + 7,1490 \cdot S - 9,5460 \cdot N \quad (6.14)$$

Nella (6.13) i consumi di energia elettrica sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una buona correlazione (R multiplo= 0,67); nella (6.14) i consumi di energia elettrica sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una buona correlazione (R multiplo= 0,61).

$$CP = -973,41 + 13,528 \cdot S + 564,38 \cdot N + 2,3329 \cdot GG \quad (6.15)$$

$$CP = 2729,88 + 16,106 \cdot S + 448,67 \cdot N \quad (6.16)$$

Nella (6.15) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una correlazione discreta (R multiplo= 0,58); nella (6.16) i consumi di energia primaria sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una discreta correlazione (R multiplo= 0,53) sebbene minore della precedente.

$$ACC = -1042,5 + 7,0316 \cdot S + 53,476 \cdot N + 0,78878 \cdot GG \quad (6.17)$$

$$ACC = 230,91 + 7,9032 \cdot S + 14,353 \cdot N \quad (6.18)$$

Nella (6.17) i carichi accumulabili sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una correlazione molto buona (R multiplo= 0,87); nella (6.18) i carichi accumulabili sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta ancora una correlazione molto buona (R multiplo= 0,82).

$$Elng = -493,77 + 0,60829 \cdot S + 27,410 \cdot N + 0,42393 \cdot GG \quad (6.19)$$

$$Elng = 190,63 + 1,0768 \cdot S + 6,3837 \cdot N \quad (6.20)$$

Nella (6.19) i carichi differibili sono espressi in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una bassa correlazione (R multiplo= 0,24); nella (6.20) i carichi differibili sono espressi in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta una correlazione molto bassa (R multiplo= 0,14).

$$FER\% = 0,75993 - 8,6526 \cdot 10^{-5} \cdot S + 1,2113 \cdot 10^{-3} \cdot N - 6,5797 \cdot 10^{-5} \cdot GG \quad (6.21)$$

$$FER\% = 0,65397 - 1,6169 \cdot 10^{-4} \cdot S + 4,4541 \cdot 10^{-3} \cdot N \quad (6.22)$$

Nella (6.21) la quota di utilizzo delle FER è espressa in funzione di tre variabili (superficie, numero di occupanti e gradi giorno) e la funzione di regressione presenta una bassa correlazione (R multiplo= 0,23); nella (6.22) la quota di utilizzo delle FER è espressa in funzione di due sole variabili (superficie utile e numero di occupanti) e la funzione di regressione presenta una correlazione molto bassa (R multiplo= 0,13).

6.4 Considerazioni di riepilogo e conclusive

In questo paragrafo sono mostrati i risultati delle simulazioni effettuate volte a considerare gli effetti sui consumi energetici di una riqualificazione complessiva delle residenze mantenendo gli attuali vettori energetici per il riscaldamento e per la preparazione di acqua calda sanitaria (Scenario #R3) e con totale elettrificazione delle utenze (Scenario #R4).

Come descritto in precedenza, si sono voluti simulare gli effetti sul patrimonio edilizio residenziale delle riqualificazioni incentivate con il cosiddetto "Superbonus 110%".

La particolarità di questo meccanismo incentivante consiste nella misura dell'incentivo, che viene ad essere per intero a carico dello Stato. Ciò comporta, spesso, la mancanza di un calcolo di ottimizzazione circa i sistemi tecnologici adoperati; ai fini della prestazione energetica, il risultato più interessante che ne consegue è un sovradimensionamento dell'impianto fotovoltaico che diventa il più grande possibile, compatibilmente con gli spazi a disposizione, e di conseguenza dei sistemi di accumulo ad esso asserviti.

I risultati delle simulazioni mostrano una evidente riduzione dei consumi energetici delle abitazioni, con qualche differenziazione tra i due scenari considerati:

1. per lo scenario #R3 diminuiscono i consumi di energia primaria, diminuiscono i consumi di gas, diminuiscono i consumi di energia elettrica fino ad azzerarsi nei mesi estivi;
2. per lo scenario #R4 diminuiscono i consumi di energia primaria, si annullano i consumi di gas (per effetto dell'elettrificazione delle utenze), aumentano i consumi elettrici nel periodo invernale (sempre per effetto dell'elettrificazione delle utenze), diminuiscono i consumi di energia elettrica fino quasi ad azzerarsi nei mesi estivi;
3. l'introduzione di impianti fotovoltaici con accumulo comporta un deciso incremento dell'autoproduzione; conseguentemente cresce l'impiego di Fonti Energetiche Rinnovabili, grazie anche all'utilizzo della rinnovabile aerotermica nel caso di totale elettrificazione delle utenze.

7 Aggiunta di 4 abitazioni archetipo

Si è visto come le 14 abitazioni archetipo risultino ben rappresentative del database delle 1545 abitazioni, con un parametro di Best Fitting calcolato pari a 0,806.

Tuttavia, le evoluzioni in essere per il settore residenziale italiano delineano scenari evolutivi caratterizzati da una riqualificazione diffusa delle abitazioni, con introduzione di impianti fotovoltaici, di sistemi di accumulo e con una forte spinta all'elettrificazione delle utenze.

Per questo motivo si è ritenuto di dover procedere con l'aggiunta di altre abitazioni archetipo, aventi caratteristiche tali da poter risultare rappresentative delle abitazioni riqualificate e maggiormente elettrificate rispetto alle abitazioni.

7.1 Caratteristiche delle abitazioni archetipo

Le quattro abitazioni archetipo aggiunte sono state denominate Archetipo #15, Archetipo #16, Archetipo #17 e Archetipo #18; sono abitazioni molto elettrificate (Archetipo #15, Archetipo #16) o abitazioni totalmente elettrificate (Archetipo #17, Archetipo #18); l'Archetipo #16 e l'Archetipo #18 sono dotati di impianto fotovoltaico per l'autoproduzione di energia elettrica.

7.1.1 Archetipo #15

L'Archetipo #15 (Figura 7.1) è situato in via Ciro Menotti a Viterbo (VT); è un'abitazione di 108 m², collocata al primo piano di una palazzina di quattro piani, costruita nel periodo 1962-71; nel periodo 2010-2015 è stato ristrutturato con sostituzione integrale degli infissi e isolamento delle pareti verticali opache; è dotato di impianto di riscaldamento autonomo con caldaia a condensazione; la preparazione dell'acqua calda sanitaria è effettuata con scaldabagno a pompa di calore; è dotato di 3 pompe di calore per riscaldamento/raffrescamento che vengono largamente usate per il riscaldamento; è dotato di lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice.



Figura 7.1 – Archetipo #15 – Via Ciro Menotti, Viterbo, (fonte Google Maps).

I consumi elettrici dell'Archetipo #15 sono pari a 3.907 kWh/anno (Figura 7.2), mentre i consumi di gas sono pari a 961 Sm³/anno (Figura 7.3).

5.1 ENERGIA ELETTRICA: CONSUMI E SPESA

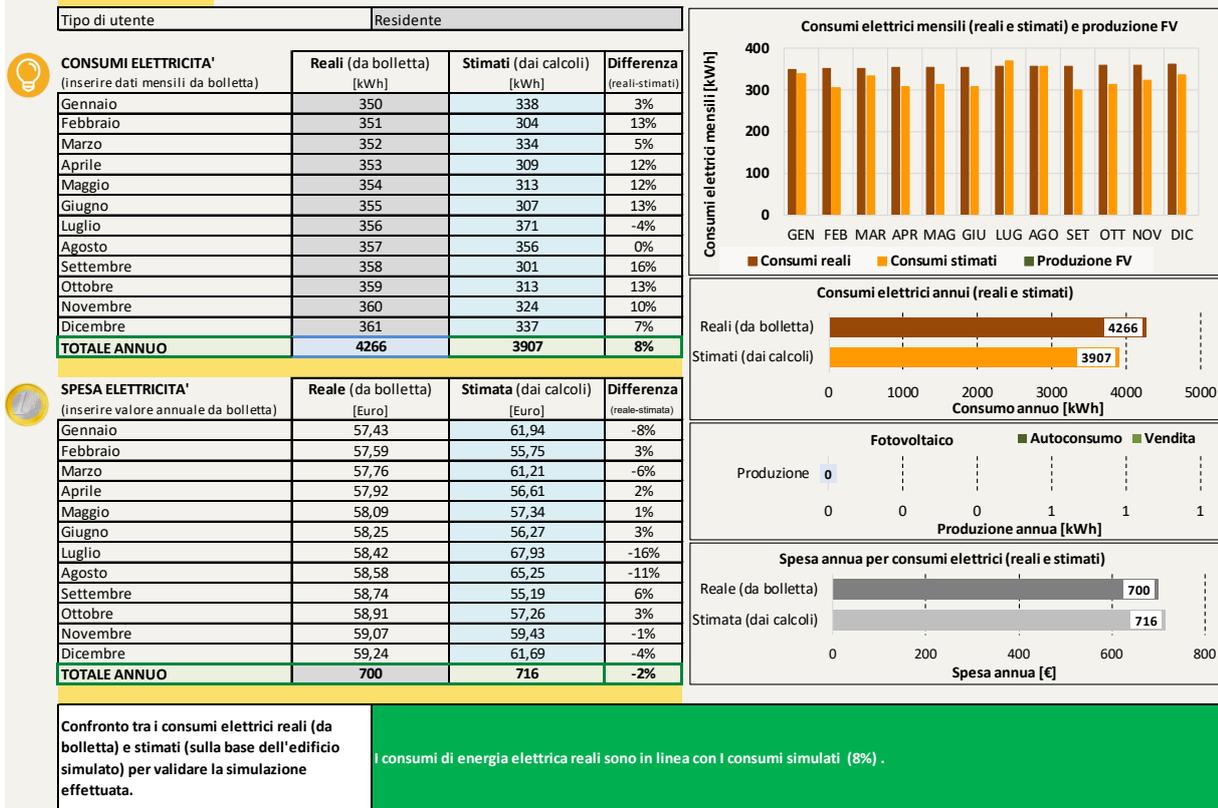


Figura 7.2 – Archetipo #15 – Energia elettrica: consumi e spesa.

5.2 GAS NATURALE: CONSUMI E SPESA

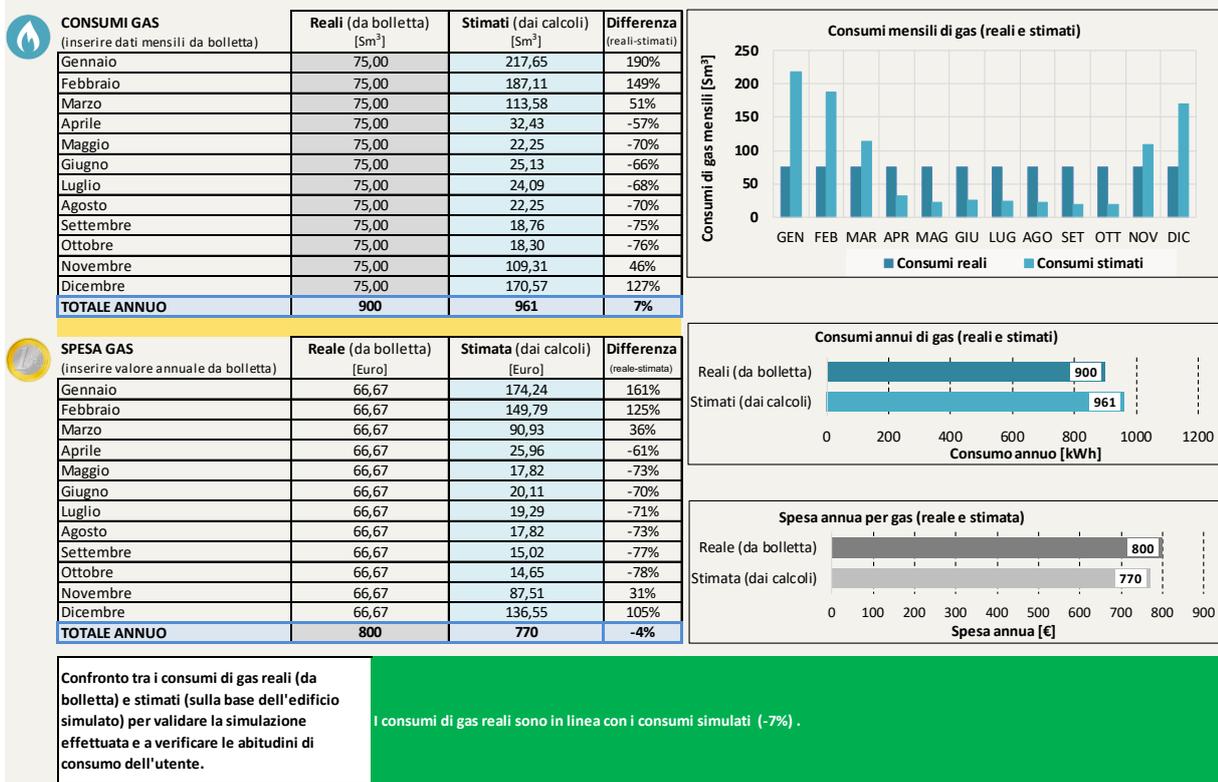


Figura 7.3 – Archetipo #15 – Gas naturale: consumi e spesa.

Nel confronto con i benchmark di archivio, i consumi elettrici risultano superiori, mentre i consumi di gas risultano inferiori (Figura 7.4).

In termini di energia primaria, i servizi che hanno l'incidenza maggiore sono il riscaldamento (37,2%), l'utilizzo di computer e internet (15,3%), la cucina (14,2%), il lavaggio (14,2%) e la preparazione di acqua calda sanitaria (9,4%).

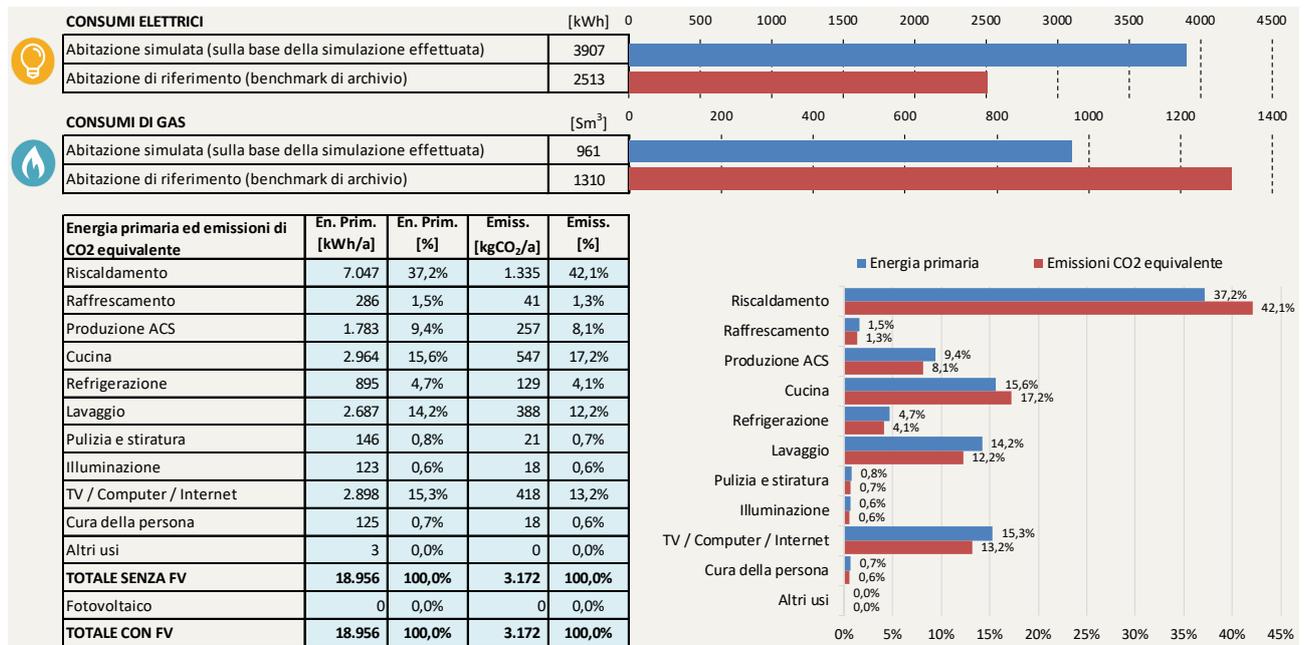


Figura 7.4 – Archetipo #15 Vs benchmark – Consumi elettrici e consumi di gas.

L'elettificazione dell'Archetipo #15 è pari al 49,9%, risultando superiore al valore benchmark di archivio (35,8%). I carichi flessibili sono pari a 2.056 kWh/anno, risultando pari al 52,6% dei consumi elettrici totali (Figura 7.5).

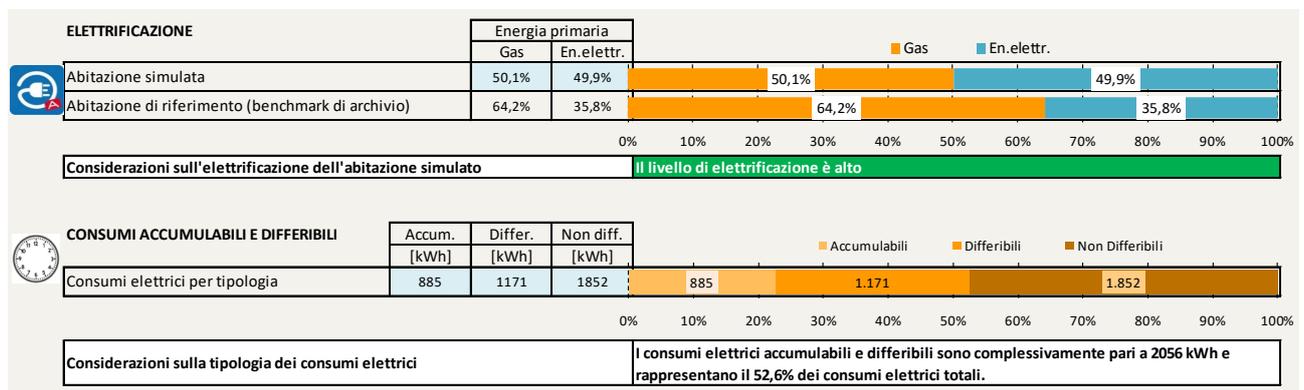


Figura 7.5 – Archetipo #15 – Elettificazione e carichi flessibili.

7.1.2 Archetipo #16

L'Archetipo #16 (Figura 7.6) è situato in via Angiolino Zampi, a San Martino al Cimino, Viterbo (VT); è un'abitazione di 147 m², che si sviluppa da cielo a terra in un villino quadrifamiliare; è stata costruita nel periodo 1991-2005; nel periodo 2010-2015 è stata ristrutturata con sostituzione integrale degli infissi e isolamento delle pareti verticali opache; è dotata di impianto di riscaldamento autonomo con caldaia a

condensazione; la preparazione dell'acqua calda sanitaria è effettuata con scaldabagno a pompa di calore; è dotata di 3 pompe di calore per riscaldamento/raffrescamento, poco usate per il riscaldamento; è dotata di lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice; è dotata di un impianto fotovoltaico da 3 kWp.



Figura 7.6 – Archetipo #16 – Via Angiolino Zampi, San Martino al Cimino, Viterbo (fonte Google Maps).

I consumi elettrici dell'Archetipo #16 sono pari a 3907 kWh/anno (Figura 7.7), mentre i consumi di gas sono pari a 961 Sm³/anno (Figura 7.8).

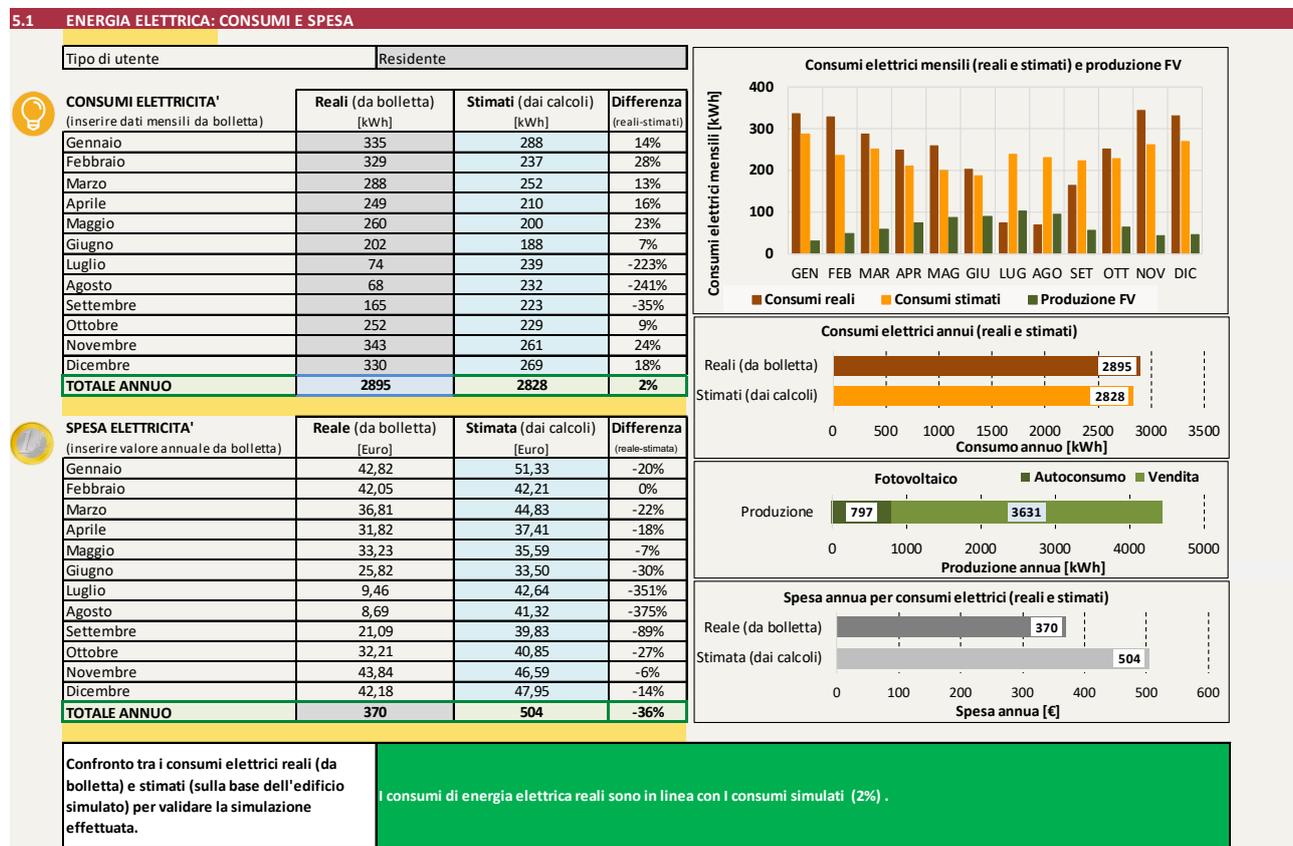


Figura 7.7 – Archetipo #16 – Energia elettrica: consumi e spesa.

5.2 GAS NATURALE: CONSUMI E SPESA

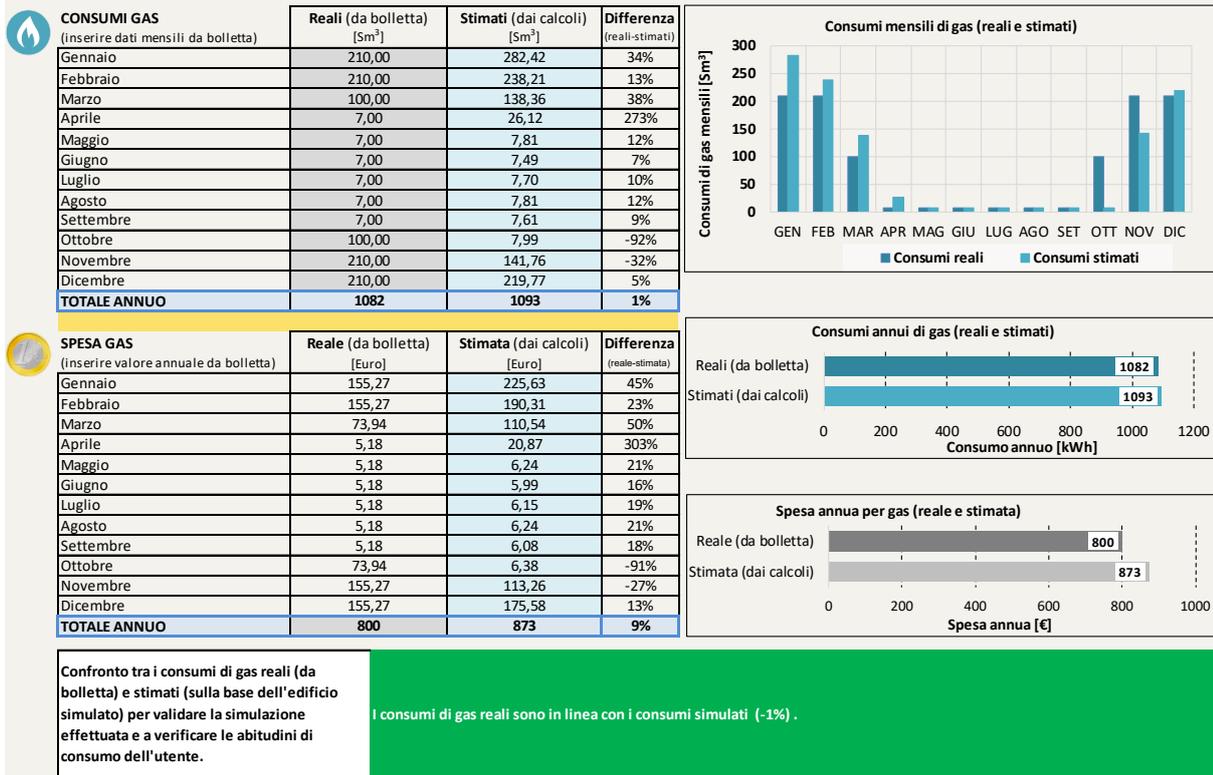


Figura 7.8 – Archetipo #16 – Gas naturale: consumi e spesa.

Nel confronto con i benchmark di archivio, i consumi elettrici risultano superiori, mentre i consumi di gas risultano inferiori (Figura 7.9).

In termini di energia primaria, i servizi che hanno l'incidenza maggiore sono il riscaldamento (54,5%), il lavaggio (18,0%), la preparazione di acqua calda sanitaria (8,3%) e la cucina (7,0%).

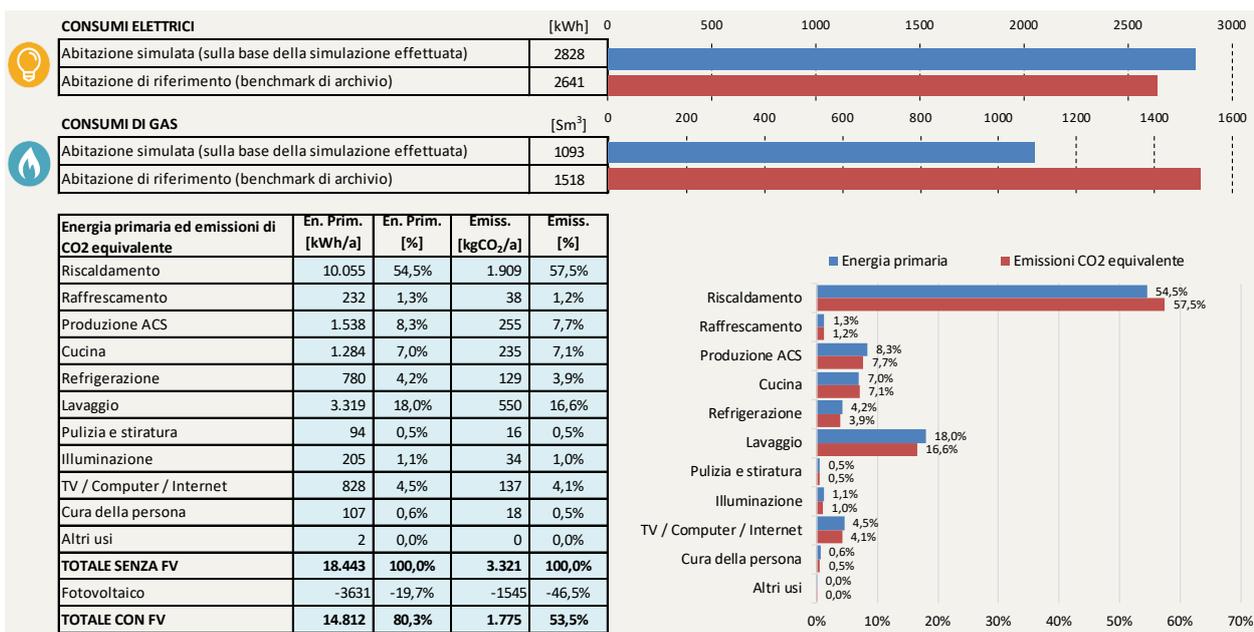


Figura 7.9 – Archetipo #16 Vs benchmark – Consumi elettrici e consumi di gas.

L'elettificazione dell'Archetipo #16 è pari al 41,4%, risultando superiore al valore benchmark di archivio (35,8%). I carichi flessibili sono pari a 2.507 kWh/anno, risultando pari al 69,2% dei consumi elettrici totali (Figura 7.5).

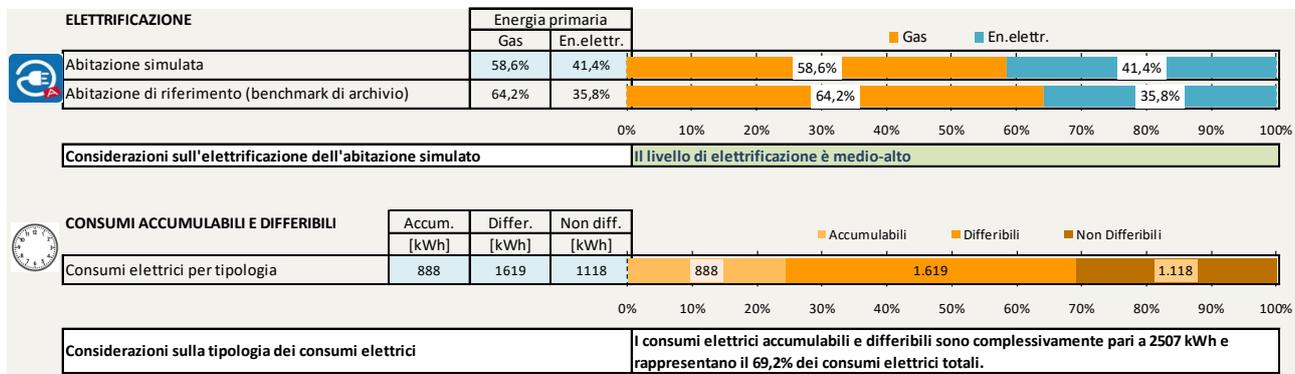


Figura 7.10 – Archetipo #16 – Elettificazione e carichi flessibili.

7.1.3 Archetipo #17

L'Archetipo #17 (Figura 7.11) è situato in via degli Olimpionici a Roma (RM); è un'abitazione di 121 m², collocata al secondo piano di una palazzina di due piani; è stata costruita nel periodo 1946-61; nel periodo "Dopo il 2015" è stata ristrutturata con sostituzione integrale degli infissi; è dotata di impianto di riscaldamento autonomo con pompa di calore elettrica; la preparazione dell'acqua calda sanitaria è effettuata con scaldabagno a pompa di calore; 10 stanze su 10 sono dotate di impianto di raffrescamento; è dotata di lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice; ha anche una cucina a induzione e pertanto tutte le utenze dell'abitazione sono elettriche.



Figura 7.11 – Archetipo #17 – Via degli Olimpionici, Roma (fonte Google Maps).

L'Archetipo #17 è totalmente elettrificato (100%); i consumi elettrici sono pari a 7.667 kWh/anno (Figura 7.12), mentre i consumi di gas sono nulli.

5.1 ENERGIA ELETTRICA: CONSUMI E SPESA

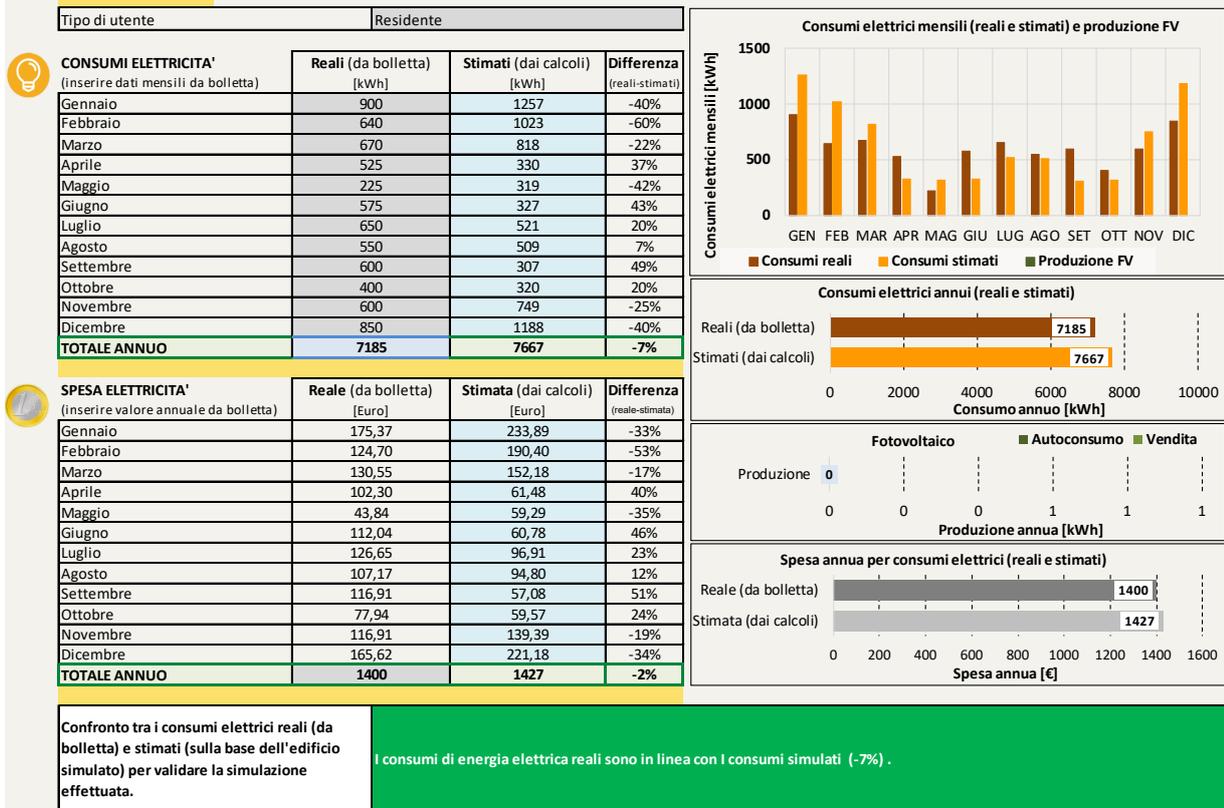


Figura 7.12 – Archetipo #17 – Energia elettrica: consumi e spesa.

Nel confronto con i benchmark di archivio, i consumi elettrici risultano ovviamente superiori, mentre i consumi di gas risultano nulli e quindi inferiori (Figura 7.13).

In termini di energia primaria, i servizi che hanno l'incidenza maggiore sono il riscaldamento (45,0%), il lavaggio (12,1%), la cucina (11,9%) e la preparazione di acqua calda sanitaria (8,1%).

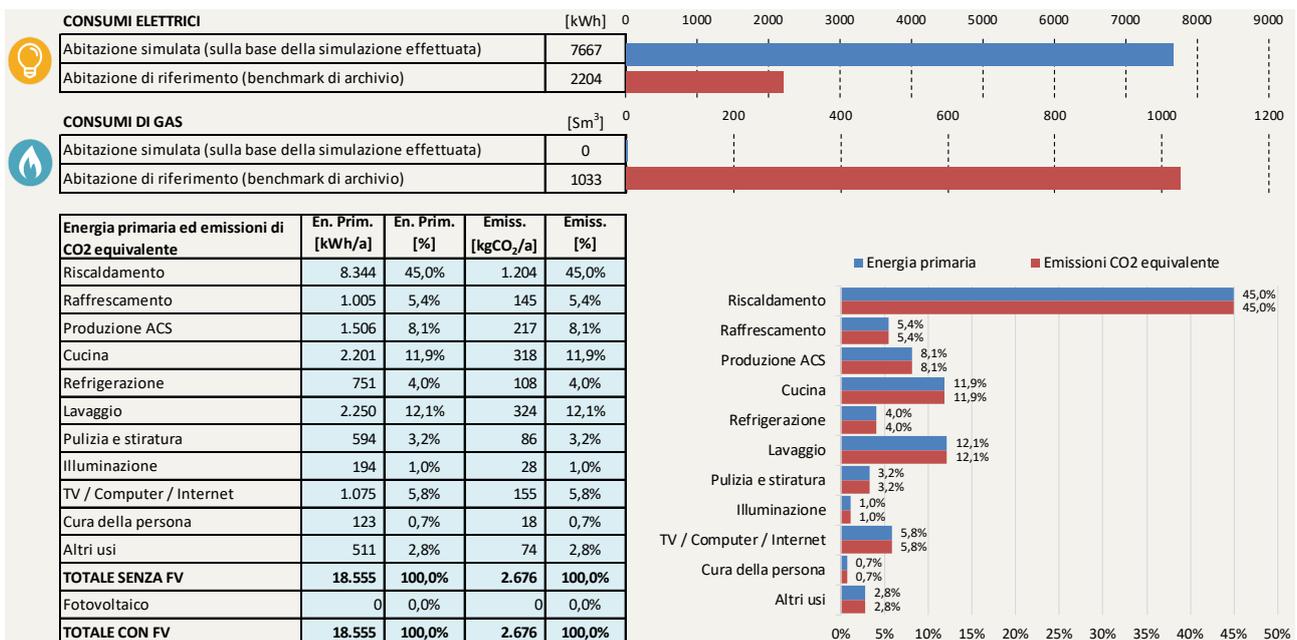


Figura 7.13 – Archetipo #17 Vs benchmark – Consumi elettrici e consumi di gas.

L'elettificazione dell'Archetipo #17 è pari al 100%, risultando superiore al valore benchmark di archivio (35,8%). I carichi flessibili sono pari a 5.643 kWh/anno, risultando pari al 73,6% dei consumi elettrici totali (Figura 7.14).

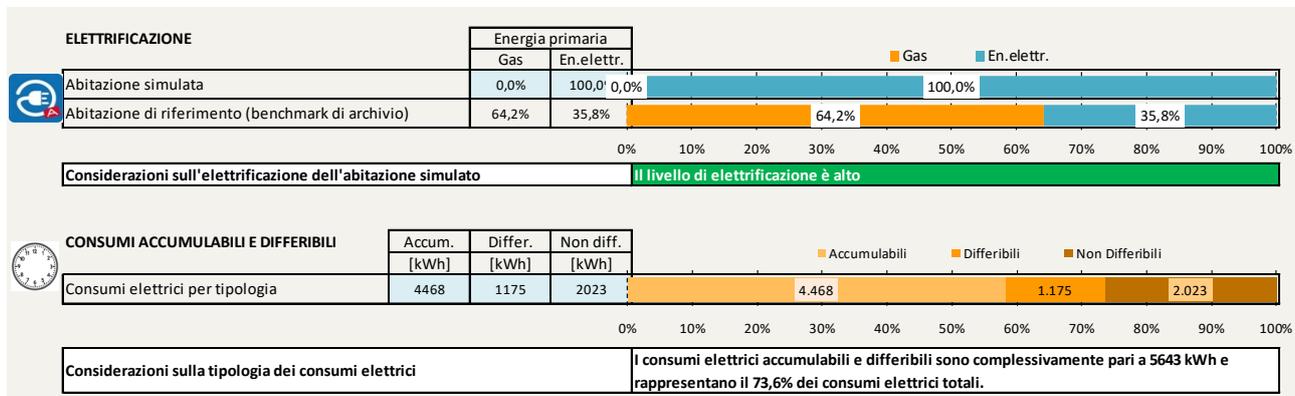


Figura 7.14 – Archetipo #17 – Elettrificazione e carichi flessibili.

7.1.4 Archetipo #18

L'Archetipo #18 (Figura 7.15) è situato in via Danimarca a Roma (RM); è un'abitazione di 120 m², collocata al secondo piano di una palazzina di due piani; è stata costruita nel periodo 1946-61; nel periodo "Dopo il 2015" è stata ristrutturata con sostituzione integrale degli infissi; è dotata di impianto di riscaldamento autonomo con pompa di calore elettrica; la preparazione dell'acqua calda sanitaria è effettuata con scaldabagno a pompa di calore; 8 stanze su 10 sono dotate di impianto di raffrescamento; è dotato di lavatrice e lavastoviglie; è dotata di un impianto fotovoltaico da 5,4 kWp; ha anche una cucina a induzione e pertanto tutte le utenze dell'abitazione sono elettriche.



Figura 7.15 – Archetipo #18 – Via Danimarca, Roma (fonte Google Maps).

L'Archetipo #18 è totalmente elettrificato (100%); i consumi elettrici sono pari a 4.768 kWh/anno (Figura 7.16), mentre i consumi di gas sono nulli.

5.1 ENERGIA ELETTRICA: CONSUMI E SPESA

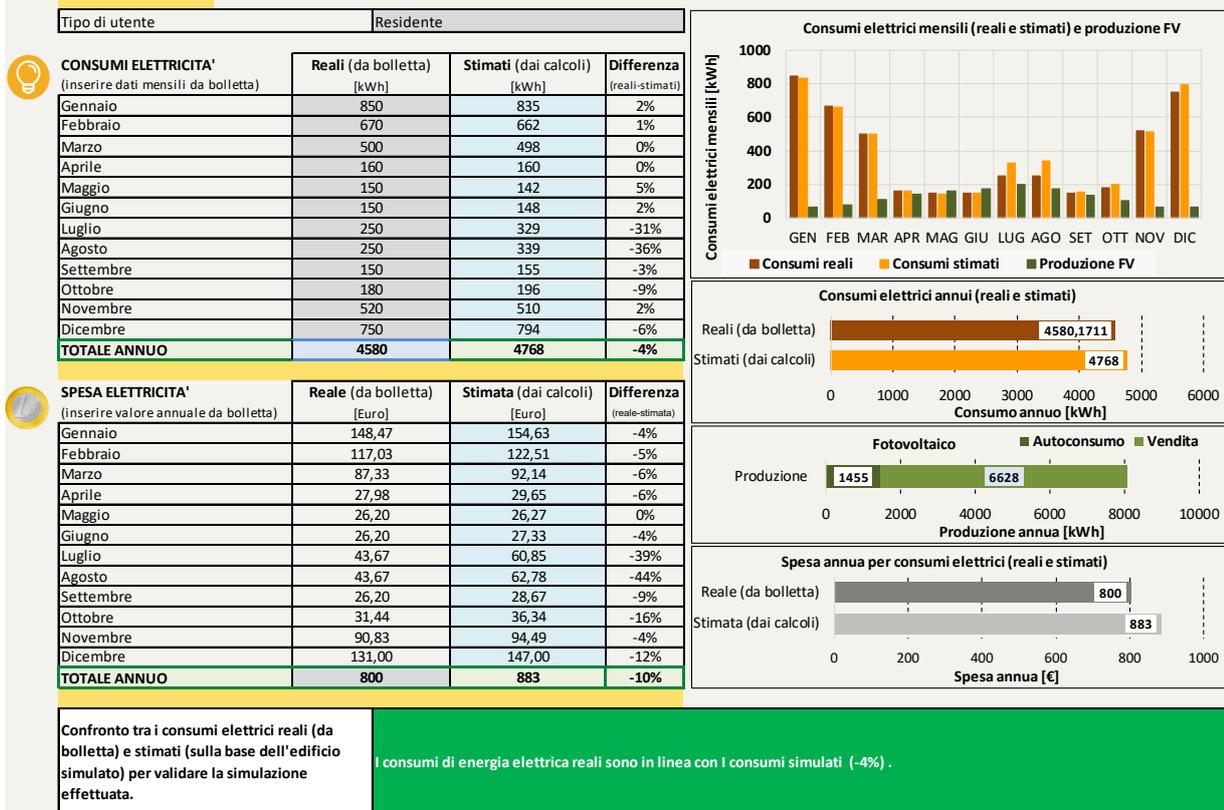


Figura 7.16 – Archetipo #18 – Energia elettrica: consumi e spesa.

Nel confronto con i benchmark di archivio, i consumi elettrici risultano ovviamente superiori, mentre i consumi di gas risultano nulli e quindi inferiori (Figura 7.17).

In termini di energia primaria, i servizi che hanno l'incidenza maggiore sono il riscaldamento (35,0%), la cucina (19,0%), la preparazione di acqua calda sanitaria (10,7%), computer e internet (10,1%) e il lavaggio (8,5%).

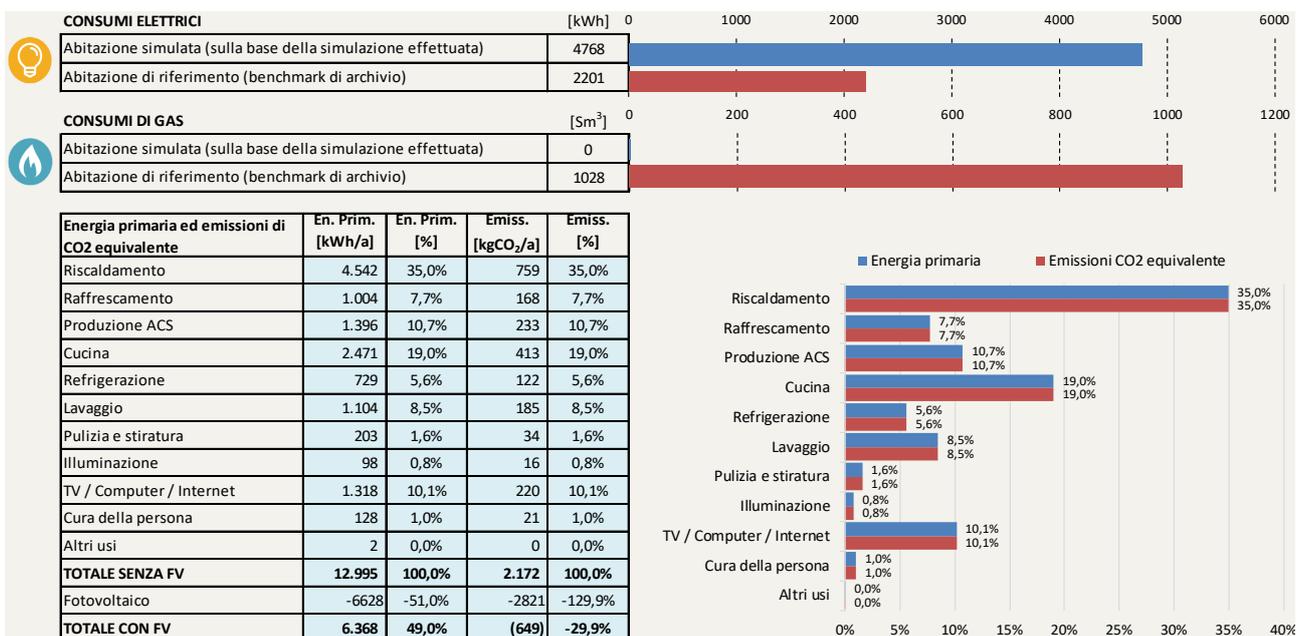


Figura 7.17 – Archetipo #18 Vs benchmark – Consumi elettrici e consumi di gas.

L'elettrificazione dell'Archetipo #18 è pari al 100%, risultando superiore al valore benchmark di archivio (35,8%). I carichi flessibili sono pari a 3.933 kWh/anno, risultando pari al 63,2% dei consumi elettrici totali (Figura 7.18).

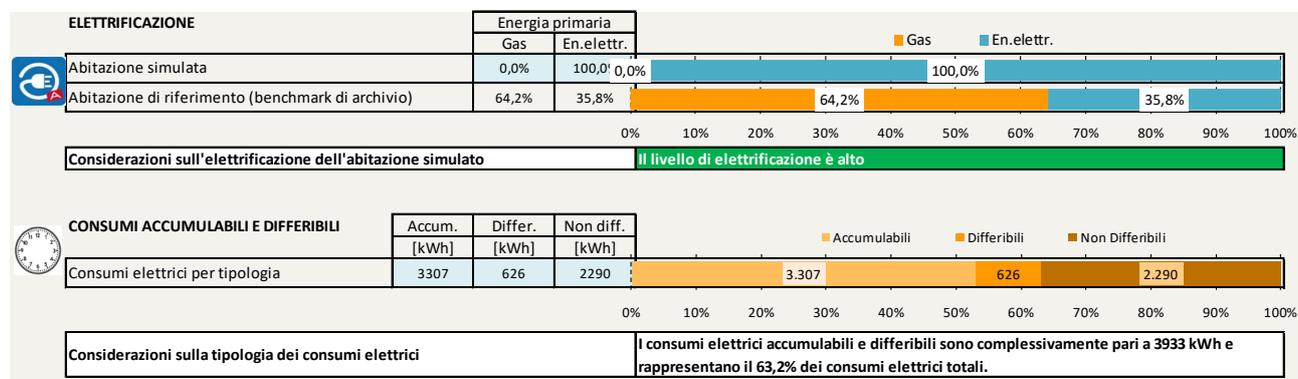


Figura 7.18 – Archetipo #18 – Elettrificazione e carichi flessibili.

7.1.5 Riepilogo delle caratteristiche dei nuovi Archetipi

La Tabella 7.1 riepiloga le caratteristiche salienti dei 4 nuovi archetipi; la Tabella 7.2 riporta, relativamente ai 4 archetipi, la composizione della famiglia e le modalità di occupazione dell'abitazione.

Tabella 7.1 – Caratteristiche salienti dei 4 nuovi archetipi.

Archetipo	Superficie in pianta [m ²]	Heating & DHW*	Cooling*	PV array	WM**	DW**	TD**
#15	108	CB + HP	3 HP		10; 10; A+++	14; 10; A+	9; 0,5; A++
#16	101	CB + HP	3 HP	3,0 kW	10; 10; A+++	14; 10; A+++	9; 10; A+++
#17	121	HP	10 HP		8; 5; A+++	14; 5; D	6; 5; A+
#18	120	HP	8 HP	5,4 kW	8; 7; A	9; 2; A+	

* Heating & DHW (riscaldamento e prep. acqua calda sanitaria); Cooling (raffrescamento) NCB: Non-Condensing Boiler (caldaia a gas tradizionale); CB: Condensing Boiler (caldaia a gas a condensazione); HP: Heat Pump (pompa di calore)

** WM Lavatrice; DW lavastoviglie; TD Asciugatrice; Capacità, cicli settimanali, Classe energetica.

Tabella 7.2 – Composizione delle famiglie e occupazione dell'abitazione per i 14 archetipi.

Archetipo	Occupanti*	Descrizione
#15	4; (1; 2; 4; 4)	Famiglia con due figli adolescenti e due genitori lavoratori
#16	4; (0;3; 4; 4)	Famiglia con due figli adolescenti e due genitori lavoratori
#17	1; (1; 2; 3; 3)	Famiglia con un figlio e due genitori lavoratori
#18	4; (1; 3; 3; 3)	Famiglia con figli adolescenti e un genitore che lavora

* Numero di occupanti; (8 a.m. ÷ 1 p.m.; 1 p.m. ÷ 7 p.m.; 7 p.m. ÷ 12 p.m.; 12 p.m. ÷ 8 a.m.).

All'interno delle abitazioni selezionate è stata effettuata l'installazione di un kit di sensori wireless per il monitoraggio dei consumi, del comfort indoor e per il controllo di alcune utenze termiche ed elettriche.

Il numero di sensori installato è stato deciso in base alla dimensione delle abitazioni e alla tipologia degli impianti e degli elettrodomestici, come riportato in Tabella 7.3.

Tabella 7.3 – Configurazione del kit di monitoraggio per i 4 nuovi archetipi.

Funzione	Device	#15	#16	#17	#18
Energy box	Gateway	1	1	1	1
Monitoraggio	Electricity meters	1	2	2	3
	Multi-sensore (temperatura, presenza, illuminamento)	5	4	4	3
	Sensori apertura porte/finestre	5	4	4	3
Controllo	Smart Valves	0	0	0	0
	Smart Plugs	11	6	5	4
	Smart Switches	0	0	0	0

In particolare, le utenze monitorate tramite Electricity meters o tramite Smart Plugs sono le seguenti:

- Archetipo #15
 - (1) Consumo complessivo elettricità; (2) Lavatrice; (3) Lavastoviglie; (4) Asciugatrice; (5) Televisore; (6) Computer 1; (7) Computer 2 (8); Condizionatore 1; (9) Condizionatore 2; (10) Condizionatore 3; (11) Scaldabagno a pompa di calore; (12) Illuminazione tutta casa.
- Archetipo #16
 - (1) Consumo complessivo elettricità; (2) Impianto fotovoltaico; (3) Lavatrice; (4) Lavastoviglie; (5) Asciugatrice; (6) Condizionatore 1; (7) Condizionatore 2; (8) Scaldabagno a pompa di calore.
- Archetipo #17
 - (1) Consumo complessivo elettricità; (2) Pompa di calore riscaldamento e ACS; (3) Lavatrice; (4) Lavastoviglie; (5) Asciugatrice; (6) Condizionatore 1; (7) Condizionatore 2.
- Archetipo #18
 - (1) Consumo complessivo elettricità; (2) Pompa di calore riscaldamento e ACS; (3) Impianto fotovoltaico; (4) Lavatrice; (5) Frigorifero; (6) Televisore; (7) Macchina caffè.

7.2 Analisi preliminare delle misurazioni effettuate

I nuovi 4 archetipi sono stati diversamente strumentati nel corso dell'anno 2021 e quindi si hanno a disposizione soltanto dati parziali, a partire dalla messa a regime dei diversi kit di monitoraggio; in particolare:

- per l'Archetipo #15 la campagna di misurazione è iniziata il 01/06/2021;
- per l'Archetipo #16 la campagna di misurazione è iniziata il 14/09/2021;
- per l'Archetipo #17 la campagna di misurazione è iniziata il 10/06/2021;
- per l'Archetipo #18 la campagna di misurazione è iniziata il 23/06/2021;

Utilizzando i dati disponibili, sono state effettuate delle analisi, per ognuno dei nuovi Archetipi, finalizzate a:

- valutare l'entità dei dati misurati rispetto ai dati di consumo globali;
- effettuare una preliminare ripartizione dei consumi tra le diverse utenze;
- effettuare un confronto tra i dati simulati e i dati reali.

7.2.1 Archetipo #15

Per l'archetipo #15 sono installati complessivamente 12 sensori per la misurazione dei consumi elettrici; uno di questi è l'Energy Meter che rileva i consumi complessivi; gli altri 11 misurano diverse utenze selezionate.

Raggruppando nella categoria "Altro" i consumi non monitorati, la Figura 7.19 mostra la ripartizione dei consumi per l'Archetipo #15.

I consumi monitorati rappresentano, per il momento, il 58,6% dei consumi elettrici complessivi.

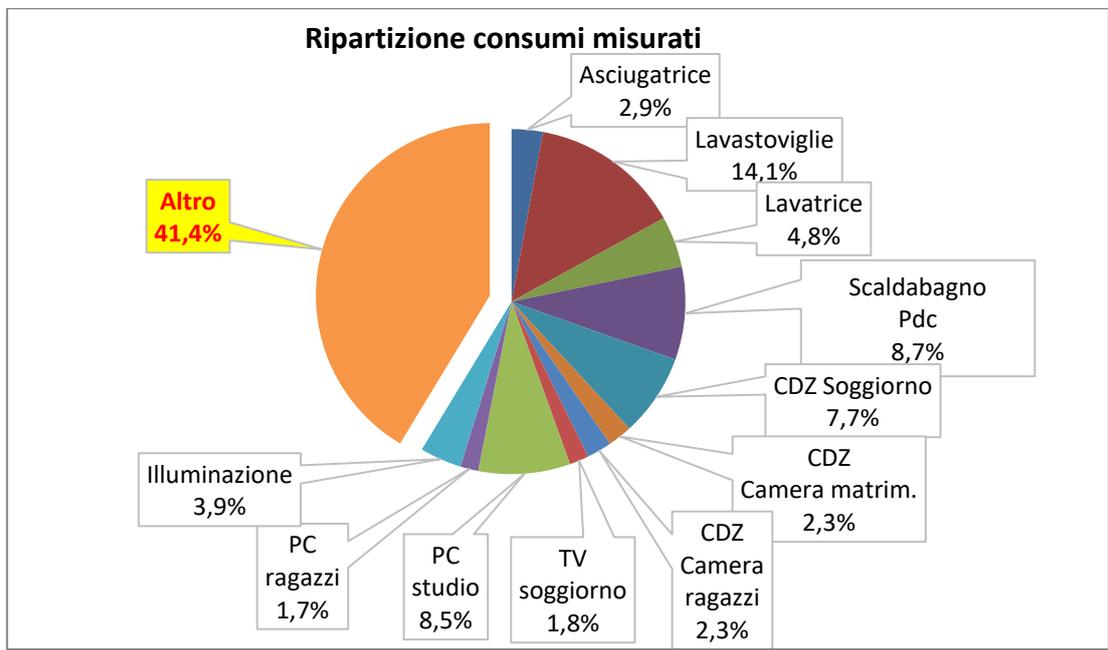


Figura 7.19 – Ripartizione dei consumi misurati per l'Archetipo #15.

Utilizzando le misurazioni effettuate nei periodi di non utilizzo dell'abitazione, nei quali l'unica utenza che veniva lasciata attiva era il frigorifero, si è potuto stimare il consumo giornaliero del frigorifero, al fine di includere il consumo di questa utenza nella ripartizione complessiva.

I risultati delle elaborazioni effettuate sono riportati in Figura 7.20, avendo incluso anche il frigorifero. I consumi del frigorifero risultano pari al 18,7% dei consumi complessivi, rimanendo così nella categoria "Altro" il 22,7% dei consumi elettrici dell'abitazione.

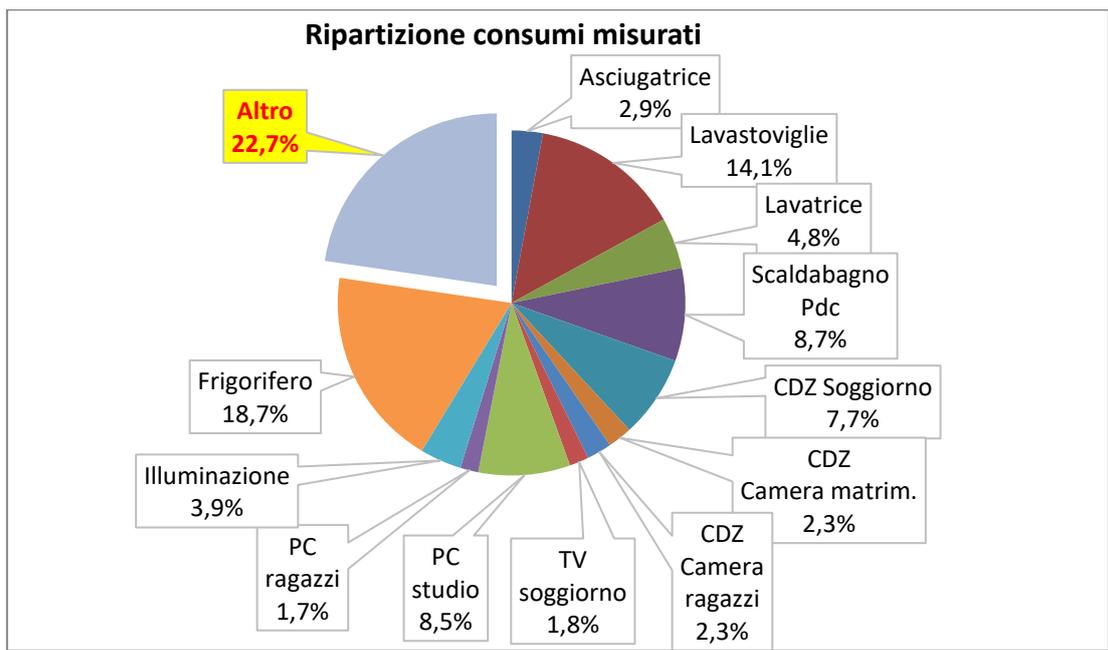


Figura 7.20 – Ripartizione dei consumi misurati per l'Archetipo #15.

In Figura 7.21 è riportato un confronto tra i consumi simulati e i dati reali per l'Archetipo #15. Per alcune utenze (Lavastoviglie, TV, Computer) si osserva un buon accordo tra i dati simulati e i dati misurati; per altre utenze (illuminazione, Scaldabagno PdC, Lavatrice, Asciugatrice) si osservano importanti differenze.

Tali circostanze saranno monitorate nel prosieguo delle attività di ricerca, al fine di comprendere se le differenze dipendono da un comportamento dell'utente diverso da quanto dichiarato nel questionario, da una imprecisa definizione delle caratteristiche e delle dotazioni dell'abitazione oppure dal processo di simulazione.

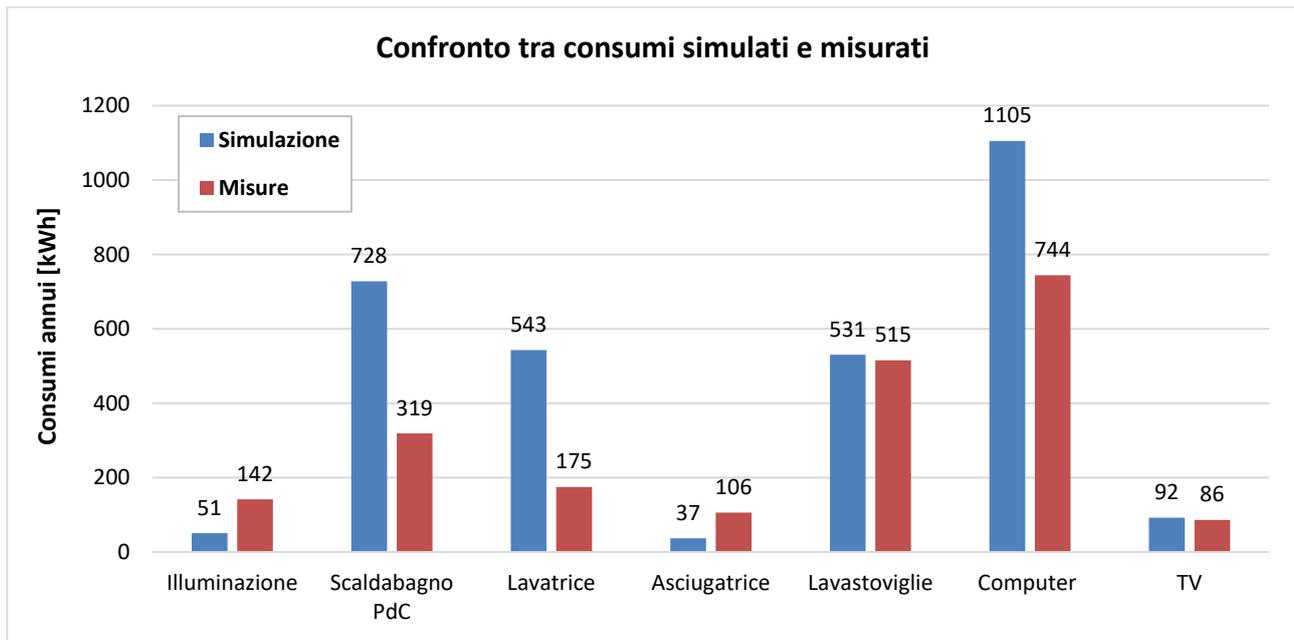


Figura 7.21 – Confronto tra consumi simulati e misurati per l'Archetipo #15.

7.2.2 Archetipo #16

Per l'archetipo #16 sono installati complessivamente 7 sensori per la misurazione dei consumi elettrici; uno di questi è l'Energy Meter che rileva i consumi complessivi; gli altri 6 misurano diverse utenze selezionate.

Raggruppando nella categoria "Altro" i consumi non monitorati, la Figura 7.22 mostra la ripartizione dei consumi per l'Archetipo #16.

I consumi monitorati rappresentano, per il momento, il 62,0% dei consumi elettrici complessivi.

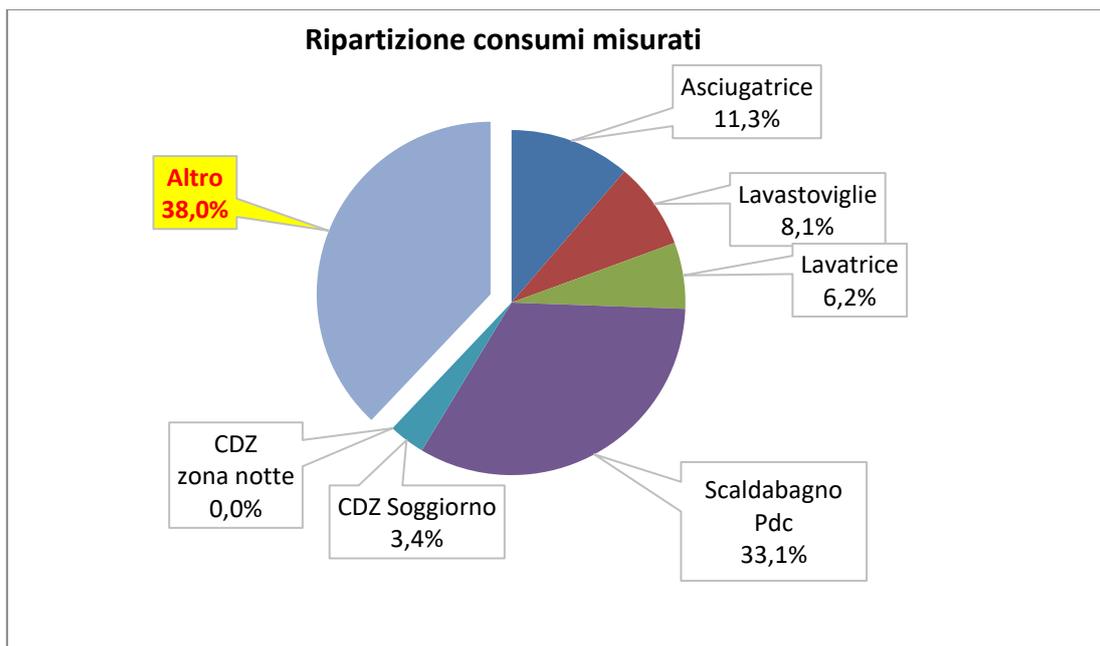


Figura 7.22 – Ripartizione dei consumi misurati per l’Archetipo #16.

In Figura 7.23 è riportato un confronto tra i consumi simulati e i dati reali per l’Archetipo #16. In generale, si osserva un basso accordo tra i dati simulati e i dati misurati per tutte le utenze.

Tale circostanza sarà monitorata nel prosieguo delle attività di ricerca, al fine di comprendere se le differenze dipendono da un comportamento dell’utente diverso da quanto dichiarato nel questionario, da una imprecisa definizione delle caratteristiche e delle dotazioni dell’abitazione oppure dal processo di simulazione.

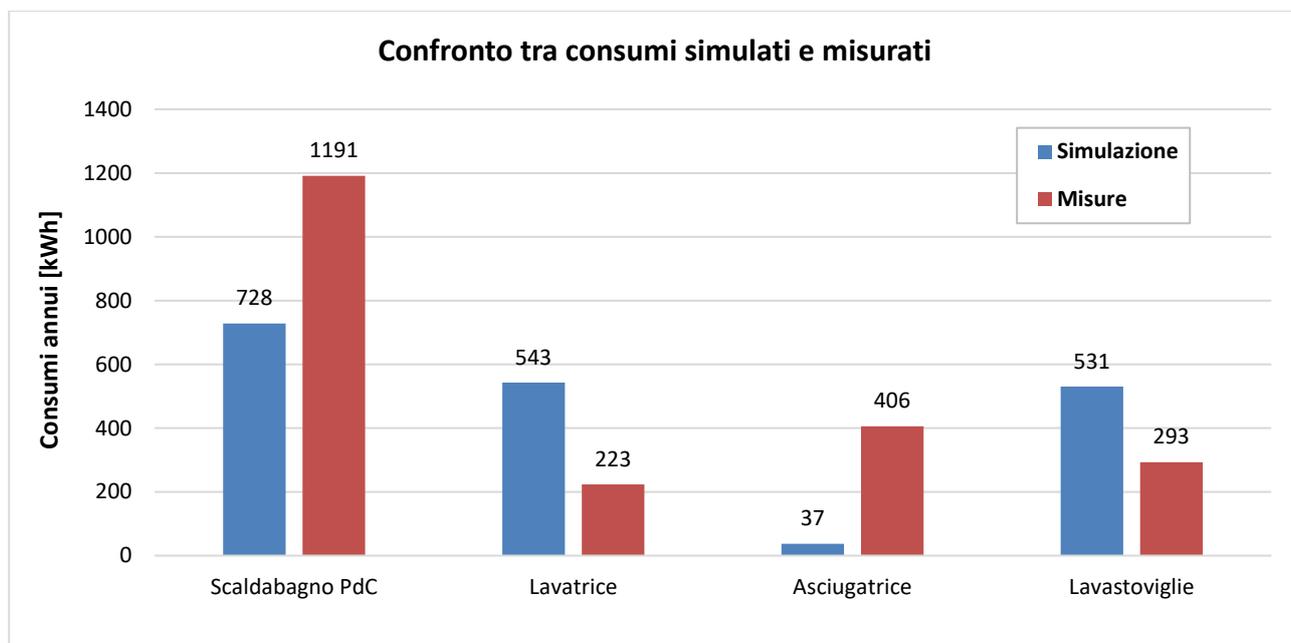


Figura 7.23 – Confronto tra consumi simulati e misurati per l’Archetipo #16.

7.2.3 Archetipo #17

Per l'archetipo #17 sono installati complessivamente 7 sensori per la misurazione dei consumi elettrici; uno di questi è l'Energy Meter che rileva i consumi complessivi; un altro Energy Meter rileva i consumi della pompa di calore per riscaldamento e preparazione ACS; gli altri 5 misurano diverse utenze selezionate.

Raggruppando nella categoria "Altro" i consumi non monitorati, la Figura 7.24 mostra la ripartizione dei consumi per l'Archetipo #17.

I consumi monitorati rappresentano, per il momento, l'80,3% dei consumi elettrici complessivi.

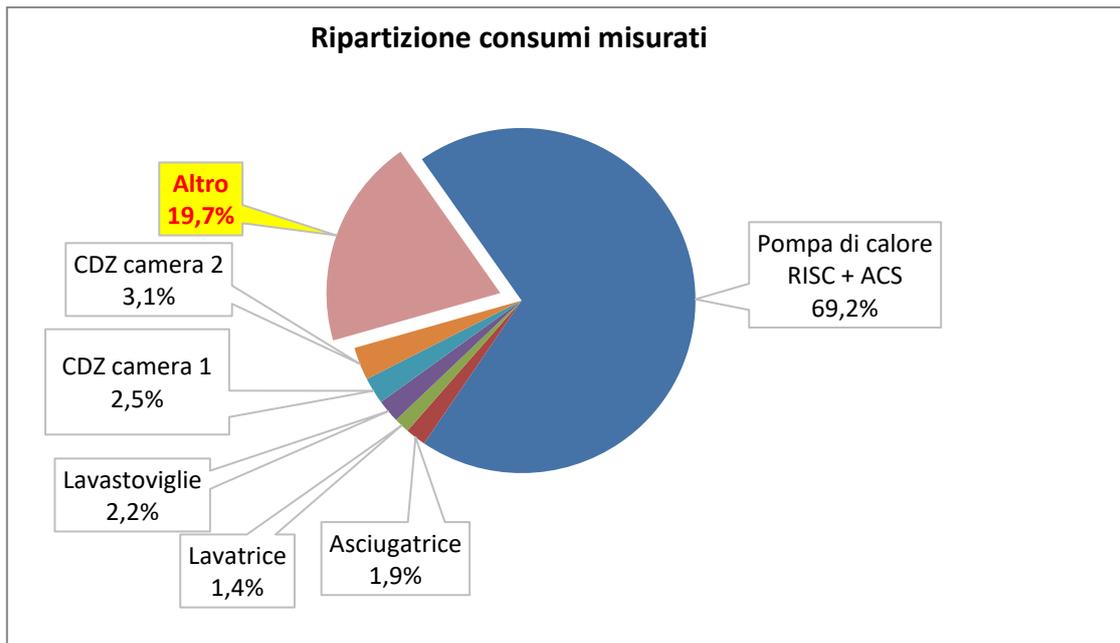


Figura 7.24 – Ripartizione dei consumi misurati per l'Archetipo #17.

In Figura 7.25 è riportato un confronto tra i consumi simulati e i dati reali per l'Archetipo #17. In generale, si osserva un basso accordo tra i dati simulati e i dati misurati per tutte le utenze.

Tale circostanza sarà monitorata nel prosieguo delle attività di ricerca, al fine di comprendere se le differenze dipendono da un comportamento dell'utente diverso da quanto dichiarato nel questionario, da una imprecisa definizione delle caratteristiche e delle dotazioni dell'abitazione oppure dal processo di simulazione.

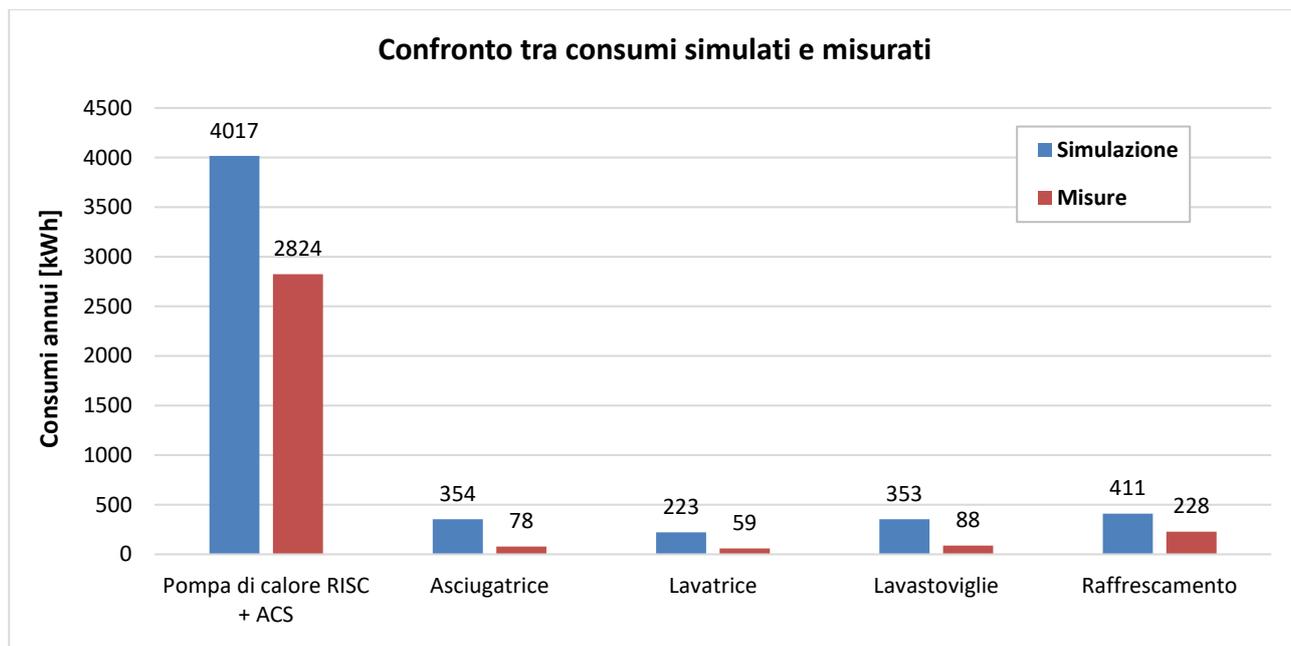


Figura 7.25 – Confronto tra consumi simulati e misurati per l’Archetipo #17.

7.2.4 Archetipo #18

Per l’archetipo #18 sono installati complessivamente 7 sensori per la misurazione dei consumi elettrici; uno di questi è l’Energy Meter che rileva i consumi complessivi; altri 2 Energy Meter misurano rispettivamente la produzione di energia elettrica dell’impianto fotovoltaico, 4 Smart Plug misurano diverse utenze selezionate. Raggruppando nella categoria “Altro” i consumi non monitorati, la Figura 7.26 mostra la ripartizione dei consumi per l’Archetipo #18.

I consumi monitorati rappresentano, per il momento, il 73,8% dei consumi elettrici complessivi.

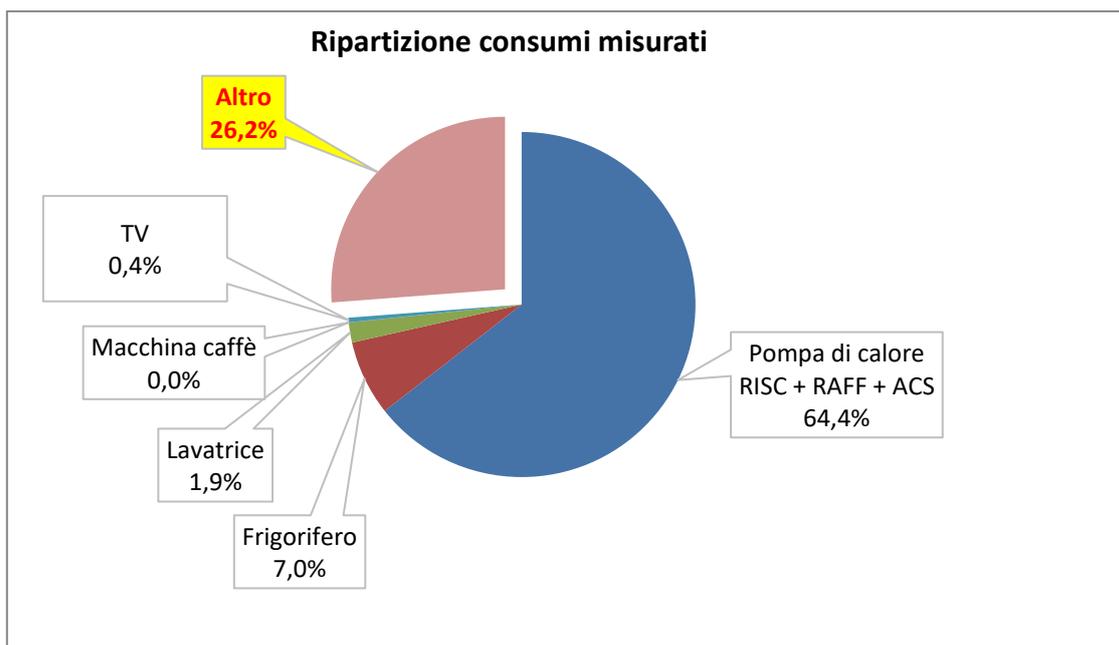


Figura 7.26 – Ripartizione dei consumi misurati per l’Archetipo #18.

In Figura 7.27 è riportato un confronto tra i consumi e le produzioni simulati e i dati reali per l'Archetipo #18. In generale, si osserva un basso accordo tra i dati simulati e i dati misurati per tutte le utenze.

Tale circostanza sarà monitorata nel prosieguo delle attività di ricerca, al fine di comprendere se le differenze dipendono da un comportamento dell'utente diverso da quanto dichiarato nel questionario, da una imprecisa definizione delle caratteristiche e delle dotazioni dell'abitazione oppure dal processo di simulazione.

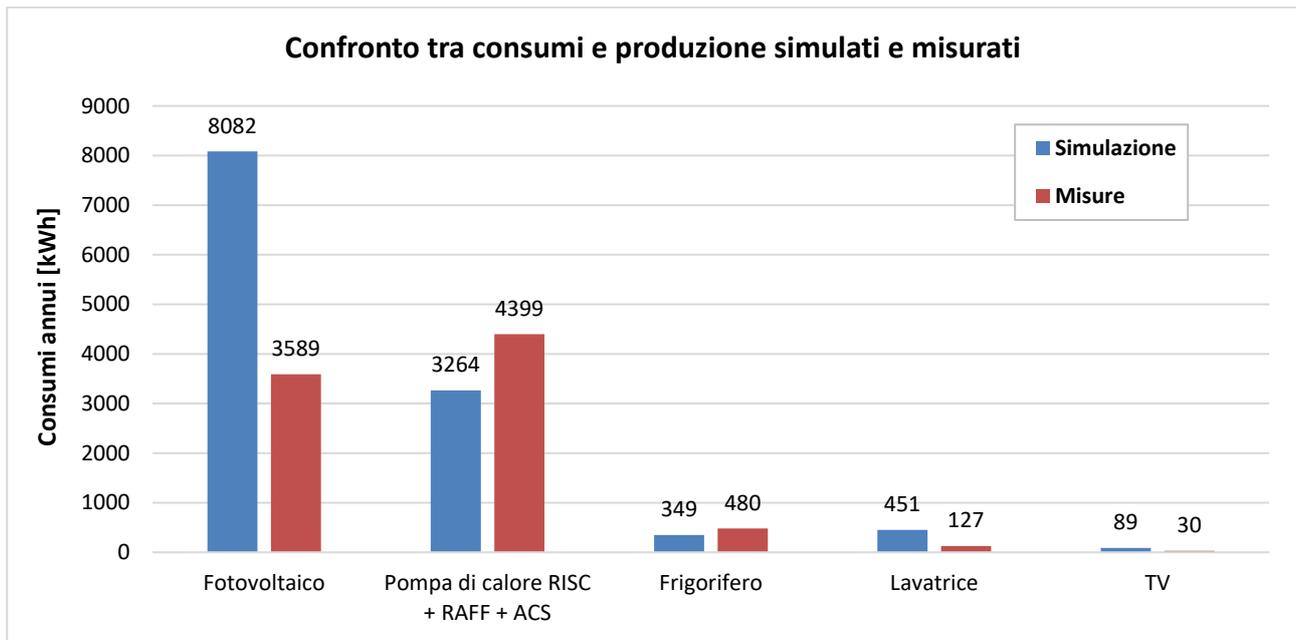


Figura 7.27 – Confronto tra consumi (e produzione) simulati e misurati per l'Archetipo #18.

7.3 Aggregazione virtuale delle utenze

L'aggiunta dei 4 nuovi archetipi è motivata dalla necessità di avere delle abitazioni di riferimento, aventi caratteristiche tali da poter risultare rappresentative delle abitazioni riqualificate e maggiormente elettrificate rispetto alle abitazioni attuali.

Tuttavia, una più ampia disponibilità di archetipi può consentire una migliore rappresentazione anche delle abitazioni già presenti nel database.

In attesa di una più ampia disponibilità di dati provenienti dalle misurazioni effettuate, utilizzando la procedura di "Best Fitting" descritta in precedenza (cfr. paragrafo 4.1.1), è stata quindi rivalutata la rappresentatività virtuale dei diversi archetipi, finalizzata successivamente alla ricostruzione dell'aggregato dei consumi di tutte le 1545 abitazioni del database.

La Tabella 7.4 riporta i dati di riferimento dei 18 archetipi.

La Figura 7.28 mostra i risultati relativi alla procedura selettiva, riportando il miglior fitting per ogni archetipo. Mediamente, per l'intero database, si ha un valore di "Best Fitting" pari a 0,810, superiore al valore di 0,806 precedente.

Tabella 7.4 – Parametri di riferimento dei 18 archetipi.

Parametri	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18
Carichi accumulabili [kWh]	191	106	111	165	950	213	112	49	181	110	46	92	122	81	885	888	4.468	3.307
Carichi differibili [kWh]	667	188	549	190	808	714	549	139	915	618	820	1.274	835	556	1.171	1.619	1175	626
Carichi non differibili [kWh]	2.648	1.024	1.085	879	1.298	1.000	1.099	881	2.384	1.218	1.049	1.754	1.439	959	1.852	1.118	2.023	2.290
Preparaz. ACS a gas=0; elettrico =1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Presenza/assenza Imp. Fotovolt.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
Superficie abitazione [m ²]	49	101	66	50	100	50	66	60	94	102	67	134	137	110	108	147	121	120
Numero occupanti [-]	4	2	3	1	4	4	2	2	3	2	3	4	3	2	4	4	3	3
Presenza/assenza in orario 8-13	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1
Presenza/assenza in orario 13-19	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	2	3	2	3
Presenza/assenza in orario 19-0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	3	3
Presenza/assenza in orario 0-8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	3	3

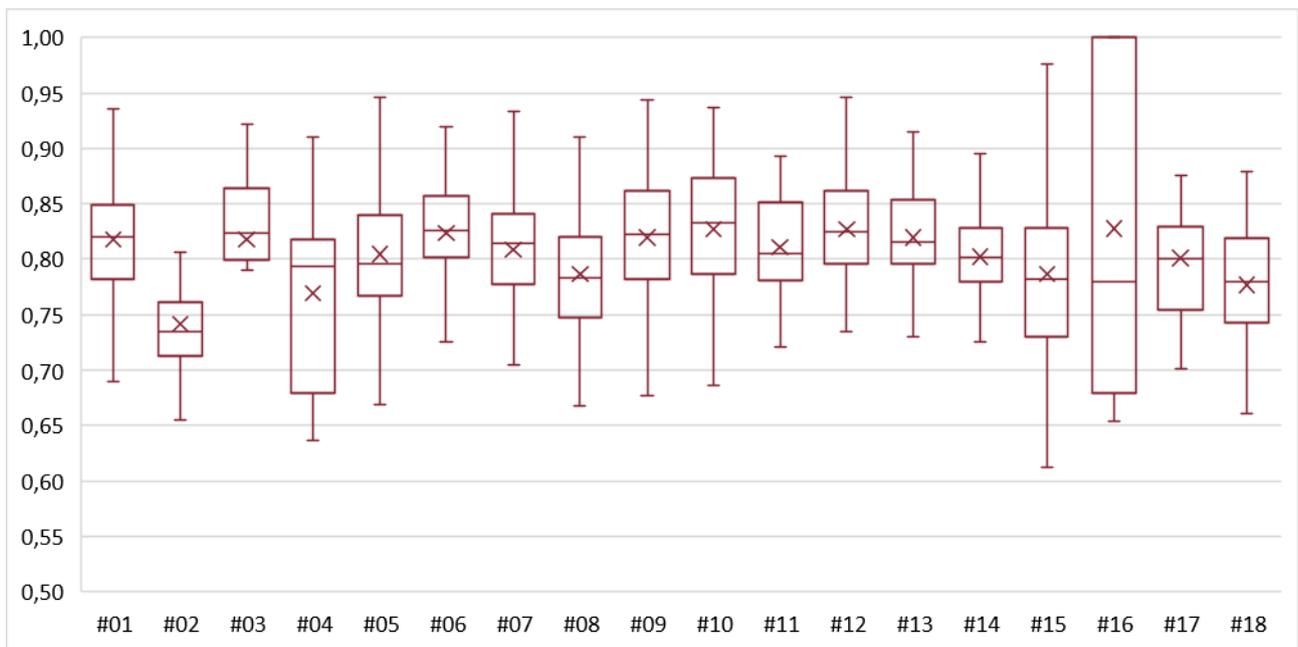


Figura 7.28 – Risultati della procedura di Best Fitting per le 1545 abitazioni.

Si è quindi proceduto a valutare la rappresentatività di ognuna delle 18 abitazioni.

La Figura 7.29 mostra la rappresentatività degli archetipi relativamente al numero delle abitazioni.

Si può osservare come i nuovi 4 archetipi risultino rappresentativi del 9,6% delle abitazioni presenti nel database, con una maggiore rappresentatività dell’archetipo #15 (5,0%) e dell’archetipo #18 (3,0%), che tra gli archetipi aggiunti possono essere considerati ai due estremi come caratteristiche (archetipo #15, molto elettrificato, senza fotovoltaico; archetipo #18, tutto elettrico, con fotovoltaico).

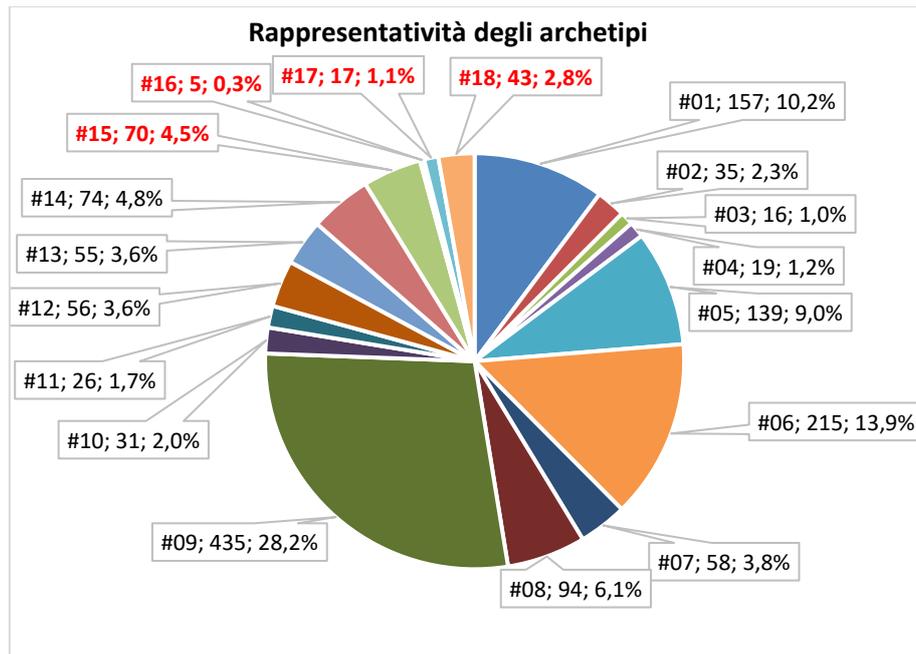


Figura 7.29 – Rappresentatività degli archetipi.

La Tabella 7.5 riporta i risultati completi dell'elaborazione effettuata, indicando per ognuna delle abitazioni monitorate la rappresentatività in termini assoluti e in termini percentuali, relativamente al numero di abitazioni, alla superficie delle abitazioni, agli occupanti, ai consumi elettrici totali, ai consumi elettrici accumulabili e ai consumi elettrici differibili.

Tabella 7.5 – Rappresentatività degli archetipi.

Archetipo	Numero abitazioni	Superficie [m ²]	Occupanti	Consumi elettrici [kWh/y]	Carichi accumulabili [kWh/y]	Carichi differibili [kWh/y]
#01	157 (11,1%)	21119 (11,8%)	604 (13,4%)	496979 (12,6%)	32057 (6,6%)	81856 (8,7%)
#02	35 (2,4%)	2397 (1,3%)	59 (1,3%)	68795 (1,7%)	10206 (2,1%)	7188 (0,7%)
#03	16 (1,1%)	1265 (0,7%)	51 (1,1%)	38652 (0,9%)	5795 (1,2%)	7895 (0,8%)
#04	19 (1,3%)	1302 (0,7%)	23 (0,5%)	35290 (0,9%)	7225 (1,4%)	3166 (0,3%)
#05	139 (9,8%)	17018 (9,5%)	423 (9,4%)	500412 (12,7%)	221907 (46%)	72450 (7,7%)
#06	215 (15,2%)	33708 (18,9%)	672 (14,9%)	460977 (11,7%)	46296 (9,6%)	138151 (14,6%)
#07	58 (4,1%)	4556 (2,5%)	116 (2,5%)	140548 (3,5%)	8993 (1,8%)	37973 (4%)
#08	94 (6,6%)	6165 (3,4%)	197 (4,3%)	174631 (4,4%)	14141 (2,9%)	21940 (2,3%)
#09	435 (30,8%)	60226 (33,9%)	1590 (35,4%)	1387480 (35,3%)	90848 (18,8%)	388708 (41,3%)
#10	31 (2,1%)	3175 (1,7%)	73 (1,6%)	74627 (1,9%)	10784 (2,2%)	17017 (1,8%)
#11	26 (1,8%)	2104 (1,1%)	75 (1,6%)	60083 (1,5%)	1082 (0,2%)	18790 (1,9%)
#12	56 (3,9%)	7444 (4,1%)	220 (4,9%)	177547 (4,5%)	8070 (1,6%)	64944 (6,9%)
#13	55 (3,9%)	7696 (4,3%)	194 (4,3%)	153513 (3,9%)	17086 (3,5%)	41531 (4,4%)
#14	74 (5,2%)	9450 (5,3%)	189 (4,2%)	151491 (3,8%)	7757 (1,6%)	38943 (4,1%)
#15	70 (4,9%)	10977 (6,1%)	267 (5,9%)	285861 (7,2%)	66887 (13,8%)	63078 (6,7%)
#16	5 (0,3%)	803 (0,4%)	18 (0,4%)	17404 (0,4%)	5615 (1,1%)	4855 (0,5%)
#17	17 (1,2%)	3143 (1,7%)	64 (1,4%)	113026 (2,8%)	60742 (12,5%)	13399 (1,4%)
#18	43 (3%)	5448 (3%)	159 (3,5%)	223903 (5,7%)	95947 (19,8%)	23059 (2,4%)
Aggregato	1410 (100%)	177631 (100%)	4486 (100%)	3921025 (100%)	482247 (100%)	940552 (100%)

8 Conclusioni

L'obiettivo dell'attività di ricerca è stato il testing del sito web e la popolazione di un archivio dati da utilizzare per la definizione di benchmark di consumo per le utenze residenziali.

L'attività svolta si è sviluppata come una prosecuzione di attività precedenti finalizzate allo sviluppo di una procedura semplificata per la valutazione del potenziale di aggregabilità di utenze residenziali e allo studio di un modello di qualificazione e validazione dei consumi di edifici residenziali). Tale procedura è stata implementata in un foglio di calcolo Excel, che, nel tempo, ha subito aggiornamenti e modifiche utili a migliorarne il funzionamento.

In parallelo, da parte di altro gruppo di ricerca, è stata realizzata una piattaforma web volta ad ospitare il foglio di calcolo, al fine di rendere la procedura più visibile e più facilmente raggiungibile dai potenziali utenti.

La popolazione dell'archivio delle abitazioni è andata avanti, con aggiunta di 794 nuovi casi reali (rispetto ai 751 originali), arrivando così a 1545 casi reali totali (+105%). Il database attuale è in larga parte popolato da abitazioni collocate nella zona climatica D (da 1401 a 2100 Gradi Giorno, quella della città di Roma che ha 1415 GG), in conseguenza della modalità impiegata per la raccolta delle informazioni, che ha visto coinvolti principalmente gli studenti della Facoltà di Architettura della Sapienza; tuttavia, si presenta con una distribuzione più ampia in termini di gradi giorno, includendo molte abitazioni con Gradi Giorno tra 1900 e 2000, ai limiti superiori della zona climatica.

Il database è stato analizzato al fine di valutare l'incidenza dei singoli servizi e di aggiornare i benchmark di consumo.

Relativamente alla ripartizione dei servizi, si conferma la prevalenza dei consumi energetici connessi al riscaldamento (43,5%), alla preparazione di acqua calda sanitaria (12,2%) e alla cucina (13,6%), rispetto agli altri usi energetici, che hanno tutti un'incidenza inferiore al 7%.

I benchmark di consumo aggiornati sono stati implementati nel foglio di calcolo.

In questa ultima annualità di ricerca, sono stati effettuati ulteriori aggiornamenti del foglio di calcolo e sono state introdotte delle funzionalità aggiuntive, con l'obiettivo di migliorare il processo di simulazione energetica, di facilitare l'immissione dei dati di input e di adeguare il calcolo della prestazione energetica degli elettrodomestici alle nuove Direttive Comunitarie. La versione aggiornata del foglio di calcolo è stata quindi utilizzata per la realizzazione di una piattaforma web, nella quale funziona come motore di calcolo. Parallelamente ad altro gruppo di ricerca è stato effettuato il testing della piattaforma web, volto a valutarne il corretto funzionamento.

Utilizzando il database delle abitazioni, sono stati analizzati degli scenari evolutivi per il settore residenziale italiano; in particolare, le simulazioni di scenario sono state condotte per:

- valutare il reale contributo che il settore residenziale italiano può dare ad un'attività di Demand Response, utilizzando una metodologia volta all'aggregazione dei dati, che consentisse di ottenere un cluster di abitazioni rappresentativo di tutto il database a partire da un numero limitato di misurazioni;
- simulare gli effetti dell'impiego dei climatizzatori presenti nelle abitazioni (se del tipo a pompa di calore) come generatore prioritario per il riscaldamento, in affiancamento all'impianto principale di riscaldamento; tali effetti sono stati simulati considerando sia la situazione attuale (Scenario #R1) sia considerando l'aggiunta di un climatizzatore in ogni abitazione (Scenario #R2);

- simulare gli effetti sui consumi energetici di una riqualificazione complessiva delle abitazioni mantenendo gli attuali vettori energetici per il riscaldamento e per la preparazione di acqua calda sanitaria (Scenario #R3) e con totale elettrificazione delle utenze (Scenario #R4).

I risultati delle elaborazioni effettuate possono così essere sintetizzati:

1. l'applicazione delle attività DR al settore residenziale rappresenta un'opzione che può consentire un beneficio sia per le utility che per gli utenti finali; la creazione di un cluster di abitazioni consente di arrivare a enormi quantità di carichi flessibili da spostare durante il giorno, al fine di partecipare attivamente ad un programma di DR;
2. la quantificazione del potenziale di flessibilità di un'abitazione non può essere effettuata utilizzando la sola classificazione teorica dei carichi; per arrivare alla quantificazione del reale potenziale di flessibilità è necessario considerare i dati reali delle misurazioni e applicare vincoli tecnici, vincoli di funzionamento e vincoli derivanti dalla particolare strategia di gestione; l'applicazione dei vincoli comporta una considerevole riduzione del potenziale di flessibilità reale che un cluster di edifici può fornire;
3. l'utilizzo dei climatizzatori presenti nelle abitazioni come generatore prioritario comporta una diminuzione dei consumi di energia primaria per riscaldamento che si riflette sui consumi di energia primaria complessivi dell'abitazione in ragione dell'importanza di questi ultimi;
4. l'utilizzo dei climatizzatori presenti nelle abitazioni come generatore prioritario comporta un trasferimento di parte dei carichi di riscaldamento dal vettore gas al vettore energia elettrica; si ha pertanto un incremento dei consumi di energia elettrica, concentrato nei mesi invernali (per lo Scenario #R1) ed esteso anche ai mesi estivi (Scenario #R2); conseguentemente si ha un incremento dei carichi flessibili delle abitazioni, essendo sia il riscaldamento sia il raffrescamento considerati carichi accumulabili;
5. l'utilizzo dei climatizzatori presenti nelle abitazioni come generatore prioritario comporta un incremento generalizzato dei consumi elettrici, con incremento dei picchi di domanda, che in alcuni casi può risultare molto importante;
6. una riqualificazione complessiva delle abitazioni consente una significativa diminuzione dei consumi di energia primaria; mantenendo i vettori energetici attuali (Scenario #R3) diminuiscono i consumi di gas e diminuiscono i consumi di energia elettrica fino ad azzerarsi nei mesi estivi; con totale elettrificazione delle utenze (Scenario #R4), si annullano i consumi di gas, aumentano i consumi elettrici nel periodo invernale e diminuiscono i consumi di energia elettrica fino quasi ad azzerarsi nei mesi estivi.

In questa annualità di ricerca, inoltre, sono state selezionate quattro abitazioni molto elettrificate e sono state strumentate al fine di avviare una campagna di misurazioni, volta ad ampliare l'archivio delle abitazioni campione (archetipi). In particolare, le nuove abitazioni archetipo dovrebbero risultare rappresentative delle abitazioni riqualificate e maggiormente elettrificate rispetto alle abitazioni attuali, come conseguenza degli scenari evolutivi in essere.

9 Riferimenti bibliografici

- [1] L. de Santoli, F. Mancini - Studio di un modello di aggregatore di uno smart district - Ricerca di Sistema Elettrico – settembre 2016
- [2] L. de Santoli, F. Mancini, M. Cecconi - Sviluppo di una procedura semplificata per la valutazione del potenziale di aggregabilità di utenze residenziali - Ricerca di Sistema Elettrico – settembre 2017
- [3] L. de Santoli, F. Mancini, M. Cecconi - Studio di un modello di qualificazione e validazione dei consumi elettrici e termici di edifici residenziali - Ricerca di Sistema Elettrico – settembre 2018
- [4] L. de Santoli, F. Mancini, M. Cecconi - Aggiornamento modulo per la consapevolezza energetica di utenti residenziali - Ricerca di Sistema Elettrico – dicembre 2019
- [5] Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council of 4 July 2017 setting a framework for energy labelling and repealing Directive 2010/30/EU (Text with EEA relevance.) <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/1369/oj>
- [6] Commission Delegated Regulation (EU) 2021/340 of 17 December 2020 amending Delegated Regulations (EU) 2019/2013, (EU) 2019/2014, (EU) 2019/2015, (EU) 2019/2016, (EU) 2019/2017 and (EU) 2019/2018 with regard to energy labelling requirements for electronic displays, household washing machines and household washer-dryers, light sources, refrigerating appliances, household dishwashers, and refrigerating appliances with a direct sales function <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R0340&qid=1614700552574>
- [7] Mancini, F.; Romano, S.; Lo Basso, G.; Cimaglia, J.; De Santoli, L. How the Italian Residential Sector Could Contribute to Load Flexibility in Demand Response Activities: A Methodology for Residential Clustering and Developing a Flexibility Strategy. *Energies* 2020, Vol. 13 (13), 3359. <https://doi.org/10.3390/en13133359>
- [8] Mancini, F.; Cimaglia, J.; Lo Basso, G.; Romano, S. Implementation and Simulation of Real Load Shifting Scenarios Based on a Flexibility Price Market Strategy—The Italian Residential Sector as a Case Study. *Energies* 2021, Vol. 14 (11), 3080. <https://doi.org/10.3390/en14113080>
- [9] Cimaglia, J.; Romano, S.; Mancini, F. Methodology and Simulation of Electrical Grid Peak Shaving Strategy based on Photovoltaic and Storage Optimization: an Italian Residential Sector Case Study. *E3S Web of Conferences* 312, 01005 (2021). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131201005>
- [10] ISTAT – Statistiche Report- Anno 2013 - I CONSUMI ENERGETICI DELLE FAMIGLIE – 15/12/2014. https://www.istat.it/it/files//2014/12/StatReport_Consumi_energetici.pdf

Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Francesco Mancini

Ingegnere meccanico, Dottore di Ricerca in Energetica, Ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale presso la Facoltà di Architettura dell'Università La Sapienza di Roma.

Docente dal 2002 presso la stessa Facoltà, dove è attualmente titolare dell'insegnamento di Impianti Tecnici.

Dal 1999 svolge attività di ricerca prima presso il Dipartimento di Fisica Tecnica poi presso il Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura, dove si occupa prevalentemente di:

- procedure e metodologie per il controllo e il miglioramento della qualità energetico-ambientale in edilizia, con particolare riferimento allo studio del comportamento passivo dell'involucro edilizio;
- sistemi impiantistici a basso consumo di energia primaria, che impiegano fonti rinnovabili di energia o sistemi impiantistici ad alta efficienza;
- definizione di strategie di manutenzione per incrementare l'efficienza energetica di un patrimonio edilizio.

E' autore di 90 pubblicazioni scientifiche aventi come oggetto le ricerche svolte.

Marco Cecconi

Ingegnere elettrico ed elettronico, Dottore di Ricerca in Risparmio energetico e microgenerazione distribuita, libero professionista nel campo degli impianti, delle energie rinnovabili e della gestione razionale dell'energia.

Ricercatore a contratto per l'Università Sapienza, per ENEA e per aziende private (tra cui Avvenia the Energy Innovator gruppo Terna S.p.A.) su tematiche inerenti l'uso razionale dell'energia e sull'implementazione di software per la simulazione energetica dinamica degli edifici.

Docente a contratto dal 2012 al 2017 per l'Università Sapienza e l'Università LUISS Guido Carli, sulle materie di Fisica Tecnica, Impianti, Efficienza energetica, Energie rinnovabili.

Autore di 11 pubblicazioni scientifiche.

Gianluigi Lo Basso

Laureato in Ingegneria Energetica e Dottore di Ricerca in Risparmio Energetico e Microgenerazione distribuita, Ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università La Sapienza di Roma.

Docente dal 2017 al 2021 presso la Facoltà di Architettura, dove è stato titolare dell'insegnamento di Impianti Tecnici. Attualmente è titolare dell'insegnamento di Energy Management presso la Facoltà di Ingegneria Energetica.

Dal 2010 svolge attività di ricerca prima presso il CITERA (Centro di Ricerca Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Ambiente) poi dal 2013 presso il DIAEE (Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica) dove si occupa prevalentemente di:

- Tecnologie di produzione di idrogeno rinnovabile, usi finali dell'idrogeno, miscelazione dell'idrogeno nelle reti di distribuzione del gas naturale, produzione di combustibili sintetici;
- definizione di strategie energetiche per la pianificazione dell'incremento dell'uso delle rinnovabili;

- sistemi energetici avanzati, sistemi ibridi che integrano fonti rinnovabili per applicazioni su scala nazionale, regionale, distrettuale sino al singolo edificio o sistema industriale;
- sistemi impiantistici per la climatizzazione degli ambienti, progettazione energetico-impiantistica degli edifici di nuova costruzione o da ristrutturare secondo la normativa vigente.

E' autore di 50 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali aventi come oggetto le ricerche svolte.

Livio de Santoli

Professore ordinario (ING-IND/11) presso Sapienza Università di Roma; cattedra di Energy Management (Facoltà ingegneria, corso di laurea in Ingegneria Energetica) e Impianti Tecnici (Facoltà di Architettura, corso di laurea in Architettura UE).

- Delegato dell'Ateneo della Sapienza per l'Edilizia e l'Energia
- Già preside della Facoltà di Architettura Valle Giulia, Sapienza Università di Roma (2009-2010)
- Presidente di AiCARR, Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento, Refrigerazione, triennio 2014-2016
- Esperto di gestione dell'energia certificato secondo UNI-CEI 11339/2009 e in conformità con lo schema di cui all'art. 12 del DI 102/2014
- Coordinatore dell'Osservatorio della Autorità dell'Energia AEEGSI sull'efficienza energetica
- Membro del Comitato Direttivo del Coordinamento FREE (Fonti Rinnovabili e Efficienza Energetica) tra le associazioni italiane delle fonti energetiche e dell'efficienza energetica
- Membro dell'International Advisory Board della rivista scientifica internazionale Building Services Engineering Research & Technology (UK)